

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



UMA NOVA ABORDAGEM À FILTRAGEM
DE HARMÔNICOS ATRAVÉS DE
DISPOSITIVOS ELETROMAGNÉTICOS

Fernando Nunes Belchior

Uberlândia
2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

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

**UMA NOVA ABORDAGEM À FILTRAGEM
DE HARMÔNICOS ATRAVÉS DE
DISPOSITIVOS ELETROMAGNÉTICOS**

Tese apresentada por Fernando Nunes Belchior à Universidade Federal de Uberlândia, para a obtenção do título de Doutor em Ciências aprovada em 21/09/06 pela Banca Examinadora:

José Carlos de Oliveira, PhD (Orientador) - UFU
José Policarpo Gonçalves de Abreu, Dr. - UNIFEI
Luís Carlos Origa de Oliveira, Dr. - UNESP-ISA
Kleiber David Rodrigues, Dr. - UFU
Milton Itsuo Samesima, Dr. - UFU

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

B427n Belchior, Fernando Nunes, 1973-
Uma nova abordagem à filtragem de harmônicos através de dispositivos eletromagnéticos / Fernando Nunes Belchior. - 2006.

100 f. : il.

Orientador: José Carlos de Oliveira.
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia.

I. Energia elétrica - Qualidade - Teses. I. Oliveira, José Carlos de. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

UMA NOVA ABORDAGEM À FILTRAGEM DE HARMÔNICOS ATRAVÉS DE DISPOSITIVOS ELETROMAGNÉTICOS

Fernando Nunes Belchior

Tese apresentada por Fernando Nunes Belchior à
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Doutor em Ciências.

Prof. José Carlos de Oliveira, PhD
(Orientador) – UFU

Prof. Darizon Alves de Andrade, PhD
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Carmo e Lenisse e a minha irmã Ana Cláudia, pela compreensão e incentivo dedicados a mim para a realização do mesmo e pela compreensão nos momentos ausentes.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que através de seus exemplos e ensinamentos, me proporcionou estímulos para superar os momentos difíceis.

Ao Prof. Dr. **José Carlos de Oliveira** meus sinceros agradecimentos pelo apoio, paciência, incentivo e colaboração durante esta intensa convivência profissional. Agradeço também, pela amizade e confiança dispensadas, que, com toda certeza, estão além da conclusão do curso de doutorado.

À minha namorada, **Jordana**, pela paciência e compreensão nos momentos de ausência, durante o período da realização desta tese.

Ao amigo **Prof. Luis Carlos Origa de Oliveira** pelo inestimável e importante auxílio durante os ensaios experimentais tão necessários para a realização dos trabalhos.

Ao amigo da graduação, **Vitor Almeida Bernardes**, e amigos da Pós Graduação, **Ana Cláudia Azevedo, Carlos Eduardo Tavares, Bismarck Castillo, Elise Saraiva, Adeon Cecílio Pinto, João César Salve, Ivan Nunes dos Santos** pelo companherismo e importante apoio que me deram durante toda a tese.

Aos demais colegas e professores de pós-graduação, pelo incentivo e apoio que em muito contribuíram para a conclusão desta tese.

À **Marli**, pela presteza nos encaminhamentos junto à secretaria da Pós-Graduação.

À CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

A qualidade da energia elétrica se apresenta como uma área de grande interesse para os consumidores e concessionários de energia. Buscando meios para regulamentar o assunto, reconhece-se, na atualidade, a existência de recomendações, normas e critérios nacionais e internacionais voltados para a orientação dos valores limites ou de referência para os diversos indicadores que caracterizam o padrão de qualidade desejado. Dentro deste contexto, as distorções harmônicas nos sinais de tensão e corrente surgem como uma das questões mais preocupantes. Almejando, pois a preservação da qualidade do suprimento no que tange às distorções harmônicas, assim como para os demais itens de definição da qualidade, faz-se, muitas vezes necessário a utilização de técnicas para a mitigação dos fenômenos prejudiciais ao atendimento dos padrões definidos. Focando a questão do controle das distorções harmônicas, surge esta proposta de tese, a qual enfoca a utilização de duas metodologias distintas, baseadas em arranjos eletromagnéticos para a filtragem de correntes harmônicas. Uma das propostas destina-se a filtragem das correntes harmônicas de seqüência zero e outra voltada para as componentes de seqüência positiva e negativa. O trabalho apresenta os princípios de funcionamento, modelagens, análises computacionais e validação experimental dos dispositivos supramencionados. Os estudos são iniciados através da operação dos filtros sob condições ideais, seguido de investigações associados com situações não ideais de funcionamento.

Palavras-Chave: Qualidade da energia elétrica, harmônicos, filtros eletromagnéticos, seqüência zero e seqüência positiva e negativa, modelagem computacional, fatores de influência.

ABSTRACT

Nowadays, the quality of the electric energy emerges as an important subject for both the consumers and the power utilities. In this context, it is recognized the existence of national and international guide lines towards the establishment of boundary or reference values for the power indexes so as to guarantee the desired standard of voltage quality. Amongst these indicators, the harmonic distortions appear as a quite important matter and the mitigation techniques to eliminate or to reduce the level of distortions have been largely discussed in the literature. The use of classical passive and active filters are the most traditional solutions, however, some authors have pointed the possibility of using a different approach based on electromagnetic devices. Focusing this subject, this thesis investigates the use of two distinct filtering devices for harmonic filtering. The first proposal is related to the well known zero sequence harmonic components and the second to the positive and negative components. The work considers the electromagnetic filter physical principles, modeling, computational implementation, investigation of ideal and non ideal operational conditions, laboratory scale prototypes and validation tests.

Keywords: Power Quality, harmonics, electromagnetic filters, zero sequence and positive and negative sequences, computational modeling, parameters of influency.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS.....	XV
LISTA DE SÍMBOLOS	XVI
CAPÍTULO I	1
INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 - CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	2
1.3 - ESTADO DA ARTE	6
1.4 - CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA TESE.....	11
1.5 - ESTRUTURA DA TESE	12
CAPÍTULO II.....	15
CONCEPÇÕES FÍSICAS PARA OS FILTROS ELETROMAGNÉTICOS.....	15
2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	15
2.2 - ARRANJOS FÍSICOS E APLICAÇÕES	16
2.2.1 - <i>Filtro de correntes de seqüência zero</i>	16
2.2.2 - <i>Filtro de correntes de seqüência positiva e negativa</i>	28
2.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
CAPÍTULO III	38
MODELAGEM DOS FILTROS ELETROMAGNÉTICOS.....	38
3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	38
3.2 - ESTRATÉGIAS DE SIMULAÇÃO	39
3.2.1 - <i>Equações elétricas</i>	40
3.2.2 - <i>Equações elétricas e magnéticas</i>	40
3.2.3 - <i>Uso de relutâncias e forças magnetomotrizes</i>	41
3.3 - TÉCNICA DE MODELAGEM SELECIONADA	41
3.4 - MODELAGEM DO FILTRO DE SEQÜÊNCIA ZERO	45
3.5 - MODELAGEM DO FILTRO DE SEQÜÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA	52
3.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
CAPÍTULO IV	59
VALIDAÇÃO DOS MODELOS DOS FILTROS ELETROMAGNÉTICOS	59
4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	59
4.2 - FILTRO DE SEQÜÊNCIA ZERO	60
4.2.1 - <i>Protótipo do filtro de seqüência zero</i>	60
4.2.2 - <i>Validação da modelagem computacional</i>	64
4.2.3 - <i>Análise dos resultados</i>	74
4.3 - FILTRO DE SEQÜÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA	77
4.3.1 - <i>Protótipo do filtro de seqüência positiva e negativa</i>	77
4.3.2 - <i>Validação da modelagem computacional</i>	80
4.3.3 - <i>Análise dos resultados</i>	91
4.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	93
CAPÍTULO V	95
FATORES DE INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO DOS FILTROS ELETROMAGNÉTICOS.....	95

5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	95
5.2 - FATORES DE INFLUÊNCIA NOS PROCESSOS DE FILTRAGEM.....	96
5.2.1 - <i>Resultados para o filtro de seqüência zero</i>	97
Caso a-1 - Alimentação com tensão desequilibrada.....	98
Caso a-2 - Alimentação com tensão distorcida.....	106
Caso a-3 - Carga não-linear desequilibrada.....	114
Caso a-4 - Variação da indutância de dispersão.....	123
5.2.2 - <i>Filtro de seqüência positiva e negativa</i>	128
Caso b-1 - Alimentação com tensão senoidal desequilibrada.....	128
Caso b-2 - Tensão de alimentação equilibrada com valor eficaz inferior ao nominal.....	138
Caso b-3 - Carga não-linear desequilibrada.....	148
Caso b-4 - Exclusão dos resistores defasadores.....	157
5.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	166
CAPÍTULO VI.....	168
CONCLUSÕES FINAIS.....	168
CAPÍTULO VII.....	173
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	173

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Comportamento tensão x corrente de um dispositivo não-linear	3
Figura 1.2 - Decomposição de uma forma de onda através da série de Fourier.....	4
Figura 2.1 - Instalação típica do filtro eletromagnético de seqüência zero	17
Figura 2.2 - Circuito equivalente: alimentação, carga e filtro de seqüência zero.....	17
Figura 2.3 - Arranjo físico trifásico do filtro eletromagnético de seqüência zero.....	19
Figura 2.4 - Indutâncias mútuas presentes no filtro eletromagnético de seqüência zero	20
Figura 2.5 - Distribuição magnética de fluxos para o filtro de seqüência zero	21
Figura 2.6 - Circuitos seqüenciais acoplados para o filtro de seqüência zero	25
Figura 2.7 - Circuitos seqüenciais não-acoplados para o filtro de seqüência zero.....	26
Figura 2.8 - Instalação típica do filtro eletromagnético de seqüência positiva e negativa	29
Figura 2.9 - Arranjo elétrico para a redução/cancelamento das correntes harmônicas de seqüência positiva e negativa.....	29
Figura 2.10 - Compensação harmônica das correntes de ordem 5 e 7 através do filtro de seqüência positiva e negativa.....	31
Figura 2.11 - Arranjo físico trifásico do filtro eletromagnético de seqüência positiva e negativa.....	31
Figura 2.12 - Características de operação do reator saturado.....	33
Figura 2.13 - Configurações para os reatores trifásicos	34
Figura 2.14 - Intervalos de manifestação de corrente devido à saturação magnética das colunas magnéticas - conexão estrela isolada.....	35
Figura 2.15 - Formas de onda das correntes e tensões do reator trifásico em estrela isolada ..	35
Figura 2.16 - Diagrama fasorial da compensação harmônica	36
Figura 3.1 - Diagrama esquemático equivalente do template wind.sin.....	42
Figura 3.2 - Diagrama esquemático equivalente do template core.sin.....	43
Figura 3.3 - Modelo magnético equivalente do filtro de seqüência zero	45
Figura 3.4 - Modelo eletromagnético equivalente do filtro de seqüência zero para o simulador utilizado	46
Figura 3.5 - Modelo físico do filtro de seqüência zero implementado computacionalmente ..	49

Figura 3.6 - Diagrama unifilar utilizado para a visualização da eficácia do filtro de seqüência zero.....	50
Figura 3.7 - Formas de onda das tensões distorcidas aplicadas no filtro de seqüência zero e espectro harmônico da tensão Van	50
Figura 3.8 - Formas de ondas e respectivos espectros harmônicos das correntes de linha do filtro harmônico de seqüência zero	51
Figura 3.9 - Modelo magnético equivalente do filtro de seqüência positiva e negativa	52
Figura 3.10 - Diagramas de blocos do filtro harmônico de seqüência positiva e negativa implementado computacionalmente	53
Figura 3.11 - Modelo físico do filtro harmônico de seqüência positiva e negativa implementado computacionalmente	55
Figura 3.12 - Diagrama unifilar utilizado para a verificação preliminar da eficácia do filtro de seqüência positiva e negativa.....	55
Figura 3.13 - Formas de onda das tensões na entrada do filtro de seqüência positiva e negativa	56
Figura 3.14 - Formas de onda e respectivos espectros harmônicos das correntes de linha na entrada do filtro harmônico de seqüência positiva e negativa	57
Figura 4.1 - Protótipo do filtro eletromagnético de seqüência zero	60
Figura 4.2 - Formas de onda da tensão, corrente e laço de histerese obtidos no filtro eletromagnético de seqüência zero	63
Figura 4.3 - Arranjo experimental para os ensaios do filtro eletromagnético de seqüência zero	64
Figura 4.4 - Diagrama unifilar correspondente à figura 4.3	65
Figura 4.5 - Foto ilustrativa do cartão de aquisição de dados DAQP-12	66
Figura 4.6 - Diagrama trifásico utilizado para o registro das grandezas elétricas.....	66
Figura 4.7 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência zero	67
Figura 4.8 - Espectros harmônicos das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência zero	68
Figura 4.9 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência zero	69
Figura 4.10 - Espectros harmônicos das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência zero	70

Figura 4.11 - Formas de onda das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência zero	71
Figura 4.12 - Espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência zero	72
Figura 4.13 - Espectros harmônicos com distribuição seqüencial de fases para as correntes de linha na carga não-linear, no alimentador e no filtro - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência zero	73
Figura 4.14 - Formas de onda das correntes de neutro na carga, no alimentador e no filtro - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência zero	74
Figura 4.15 - Protótipo do filtro eletromagnético de seqüência positiva e negativa	77
Figura 4.16 - Formas de onda da tensão, corrente e laço de histerese obtidos no filtro eletromagnético de seqüência positiva e negativa	79
Figura 4.17 - Arranjo experimental para os ensaios do filtro eletromagnético de seqüência positiva e negativa	81
Figura 4.18 - Diagrama unifilar correspondente à figura 4.17	81
Figura 4.19 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência positiva e negativa.....	83
Figura 4.20 - Espectros harmônicos das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência positiva e negativa ...	84
Figura 4.21 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência positiva e negativa.....	85
Figura 4.22 - Espectros harmônicos das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência positiva e negativa.....	86
Figura 4.23 - Formas de onda das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência positiva e negativa.....	87
Figura 4.24 - Espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência positiva e negativa... 88	88
Figura 4.25 - Diagramas fasoriais das correntes de linha na carga e no filtro - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - 5ª ordem - filtro de seqüência positiva e negativa.....	89
Figura 4.26 - Diagramas fasoriais das correntes de linha na carga e no filtro - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - 7ª ordem - filtro de seqüência positiva e negativa.....	90

Figura 5.1 - Arranjo físico utilizado para os estudos computacionais e experimentais - filtro de seqüência zero	98
Figura 5.2 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência zero	99
Figura 5.3 - Espectros harmônicos das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência zero	100
Figura 5.4 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência zero	101
Figura 5.5 - Espectros harmônicos das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência zero	102
Figura 5.6 - Formas de onda das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência zero	103
Figura 5.7 - Espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência zero	104
Figura 5.8 - Distribuição seqüencial para as correntes de linha na carga não-linear, no alimentador e no filtro - senoidal e tensão desequilibrada - filtro de seqüência zero.....	106
Figura 5.9 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - tensão distorcida - filtro de seqüência zero	108
Figura 5.10 - Espectros harmônicos das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - tensão distorcida - filtro de seqüência zero	109
Figura 5.11 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - tensão distorcida - filtro de seqüência zero	110
Figura 5.12 - Espectros harmônicos das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - tensão distorcida - filtro de seqüência zero	111
Figura 5.13 - Formas de onda das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - tensão distorcida - filtro de seqüência zero.....	112
Figura 5.14 - Espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - tensão distorcida - filtro de seqüência zero	113
Figura 5.15 - Distribuição seqüencial para as correntes de linha na carga não-linear, no alimentador e no filtro - senoidal e tensão distorcida - filtro de seqüência zero	115
Figura 5.16 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência zero.....	116
Figura 5.17 - Espectros harmônicos das correntes na carga não-linear - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência zero.....	117

Figura 5.18 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência zero.....	118
Figura 5.19 - Espectros harmônicos das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada	119
Figura 5.20 - Formas de onda das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência zero.....	120
Figura 5.21 - Espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência zero.....	121
Figura 5.22 - Espectros harmônicos com distribuição seqüencial de fases para as correntes de linha na carga não-linear, alimentador e filtro de seqüência zero - senoidal e carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência zero	122
Figura 5.23 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear e respectivos espectros harmônicos - variação da indutância de dispersão - filtro de seqüência zero..	124
Figura 5.24 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador e respectivos espectros harmônicos - variação da indutância de dispersão - filtro de seqüência zero.....	125
Figura 5.25 - Formas de onda das correntes de linha no filtro e respectivos espectros harmônicos - variação da indutância de dispersão - filtro de seqüência zero.....	126
Figura 5.26 - Espectros harmônicos com distribuição seqüencial de fases para as correntes de linha na carga não-linear, alimentador e filtro - ideal e variação da dispersão - filtro de seqüência zero	127
Figura 5.27 - Arranjo físico utilizado para os estudos computacionais e experimentais - filtro de seqüência positiva e negativa	128
Figura 5.28 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência positiva e negativa	130
Figura 5.29 - Espectros harmônicos das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência positiva e negativa	130
Figura 5.30 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência positiva e negativa	132
Figura 5.31 - Espectros harmônicos das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência positiva e negativa	133
Figura 5.32 - Formas de onda das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência positiva e negativa	134
Figura 5.33 - Espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência positiva e negativa	135

Figura 5.34 - Diagramas fasoriais das correntes de linha na carga e no filtro - experimental e computacional - tensão de suprimento desequilibrada - 5ª ordem - filtro de seqüência positiva e negativa	137
Figura 5.35 - Diagramas fasoriais das correntes de linha na carga e no filtro - experimental e computacional - tensão de suprimento desequilibrada - 7ª ordem - filtro de seqüência positiva e negativa	138
Figura 5.36 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - tensão de suprimento reduzida - filtro de seqüência positiva e negativa	140
Figura 5.37 - Espectros harmônicos das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - tensão de suprimento reduzida - filtro de seqüência positiva e negativa	141
Figura 5.38 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - tensão de suprimento reduzida - filtro de seqüência positiva e negativa	142
Figura 5.39 - Espectros harmônicos das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - tensão de suprimento reduzida - filtro de seqüência positiva e negativa	143
Figura 5.40 - Formas de onda das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - tensão de suprimento reduzida - filtro de seqüência positiva e negativa.....	144
Figura 5.41 - Espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - tensão de suprimento reduzida - filtro de seqüência positiva e negativa	145
Figura 5.42 - Diagramas fasoriais das correntes de linha na carga e no filtro - experimental e computacional - tensão de suprimento reduzida - 5ª ordem - filtro de seqüência positiva e negativa.....	146
Figura 5.43 - Diagramas fasoriais das correntes de linha na carga e no filtro - experimental e computacional - tensão de suprimento reduzida - 7ª ordem - filtro de seqüência positiva e negativa.....	147
Figura 5.44 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência positiva e negativa	149

Figura 5.45 - Espectros harmônicos das correntes na carga não-linear - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência positiva e negativa	150
Figura 5.46 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência positiva e negativa	151
Figura 5.47 - Espectros harmônicos das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência positiva e negativa	152
Figura 5.48 - Formas de onda das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência positiva e negativa	153
Figura 5.49 - Espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência positiva e negativa	154
Figura 5.50 - Diagramas fasoriais das correntes de linha na carga e no filtro - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - 5ª ordem - filtro de seqüência positiva e negativa	155
Figura 5.51 - Diagramas fasoriais das correntes de linha na carga e no filtro - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - 7ª ordem - filtro de seqüência positiva e negativa	156
Figura 5.52 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - resistores defasadores nulos - filtro de seqüência positiva e negativa ..	158
Figura 5.53 - Espectros harmônicos das correntes na carga não-linear - experimental e computacional - resistores defasadores nulos - filtro de seqüência positiva e negativa ..	159
Figura 5.54 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - resistores defasadores nulos - filtro de seqüência positiva e negativa ..	160
Figura 5.55 - Espectros harmônicos das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - resistores defasadores nulos - filtro de seqüência positiva e negativa ..	161
Figura 5.56 - Formas de onda das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - resistores defasadores nulos - filtro de seqüência positiva e negativa	162
Figura 5.57 - Espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - resistores defasadores nulos - filtro de seqüência positiva e negativa ..	163

Figura 5.58 - Diagramas fasoriais das correntes de linha na carga e no filtro - experimental e computacional - resistores defasadores nulos - 5ª ordem - filtro de seqüência positiva e negativa.....	164
Figura 5.59 - Diagramas fasoriais das correntes de linha na carga e no filtro - experimental e computacional - resistores defasadores nulos - 7ª ordem - filtro de seqüência positiva e negativa.....	165

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Características construtivas e elétricas do protótipo do filtro de seqüência zero .	61
Tabela 4.2 - Características obtidas a partir da curva de histerese do filtro de seqüência zero	63
Tabela 4.3 - Síntese das medições utilizadas para validação do modelo computacional - filtro de seqüência zero	65
Tabela 4.4 - Síntese comparativa dos resultados da operação do filtro eletromagnético de seqüência zero sob condições ideais de suprimento	75
Tabela 4.5 - Características construtivas e elétricas do protótipo do filtro de seqüência positiva e negativa	78
Tabela 4.6 - Características obtidas a partir da curva de histerese do filtro de seqüência positiva e negativa	80
Tabela 4.7 - Síntese das medições utilizadas para validação do modelo computacional - filtro de seqüência positiva e negativa	82
Tabela 4.8 - Síntese comparativa dos resultados da operação do filtro eletromagnético de seqüência positiva e negativa sob condições ideais de suprimento	91
Tabela 5.1 - Casos analisados para as situações operacionais não-ideais	97

LISTA DE SÍMBOLOS

DTHT	- Distorção de tensão harmônica total [%]
DIHT	- Distorção de corrente harmônica total [%]
$V_h \%$	- Tensão harmônica de ordem h em porcentagem da fundamental [%]
V_h	- Tensão harmônica de ordem h [V]
V_1	- Tensão fundamental [V]
$I_h \%$	- Corrente harmônica de ordem h em porcentagem da fundamental [%]
I_h	- Corrente harmônica de ordem h [A]
I_1	- Corrente fundamental [A]
$i_{0_C}(t)$	- Corrente de seqüência zero gerada pela carga não-linear [A]
$i_{0_F}(t)$	- Corrente de seqüência zero através do filtro de seqüência zero [A]
Z_{0_S}	- Impedância de seqüência zero do sistema de suprimento (R_{0_S}, L_{0_S}) [Ω]
Z_{0_F}	- Impedância de seqüência zero do filtro de seqüência zero (R_{0_F}, L_{0_F}) [Ω]
$i_{0_S}(t)$	- Corrente de seqüência zero injetada no sistema [A]
$L_{I,1}; L_{I,2}; L_{I,3}$	- Indutância própria do enrolamento I das colunas 1, 2 e 3, respectivamente [H]
$L_{II,1}; L_{II,2}; L_{II,3}$	- Indutância própria do enrolamento II das colunas 1, 2 e 3, respectivamente [H]
L_M	- Indutância mútua entre os enrolamentos I e II de mesma coluna [H]
$M_{I,I}$	- Indutâncias mútuas entre os enrolamentos I nas três colunas [H]
$M_{II,II}$	- Indutâncias mútuas entre os enrolamentos II nas três colunas [H]
$M_{I,II}$ e $M_{II,I}$	- Indutâncias mútuas entre os enrolamentos I e II transversais nas três colunas [H]
$\Phi_{I,1}; \Phi_{I,2}; \Phi_{I,3}$	- Fluxo referente ao enrolamento I das colunas 1, 2 e 3, respectivamente [Wb]
$\Phi_{II,1}; \Phi_{II,2}; \Phi_{II,3}$	- Fluxo referente ao enrolamento II das colunas 1, 2 e 3, respectivamente [Wb]
Φ_D	- fluxo de dispersão entre o enrolamento I e II [Wb]
Φ_{AR}	- fluxo pelo caminho de ar entre o núcleo e o enrolamento I [Wb]
Φ_{EX}	- fluxo entre a culatra superior e a culatra inferior através do ar e/ou tanque [Wb]
Φ_{NU}	- fluxo que circula pelo material ferromagnético [Wb]
R_S, L_S	- Impedância do sistema de suprimento [Ω]

$i_S(t)$	- Corrente harmônica resultante injetada no sistema de suprimento [A]
$i_F(t)$	- Corrente harmônica injetada pelo filtro de seqüência positiva e negativa [A]
$i_C(t)$	- Corrente harmônica gerada pela carga não-linear [A]
ep, em	- Terminais elétricos (positivo e negativo)
mp, mm	- Terminais magnéticos (positivo e negativo)
n	- Número de espiras da bobina
r	- Resistência elétrica da bobina [Ω]
F	- Força magnetomotriz [A-espira]
ϕ	- Fluxo magnético [Wb]
i	- Corrente elétrica [A]
v	- Tensão aplicada [V]
l	- Comprimento médio do núcleo magnético [m]
A	- Área transversal do núcleo magnético [m ²]
matl	- material do núcleo. Para cada material na biblioteca do programa existe um dado que caracteriza a curva B-H do material
sf	- fator de empilhamento
u_i	- permeabilidade inicial [H/m]
u_{hc}	- permeabilidade coerciva [H/m]
b_{max}	- maior valor de B disponível para o material [G]
h_{max}	- maior valor de H disponível para o material [Ae/m]
b_{sat}	- valor de B na curva B-H que corresponde ao H de saturação [G]
h_{sat}	- ponto na curva B-H em que as curvas inferior e superior se encontram e se tornam quase que indistinguíveis [Ae/m]
br	- valor de B quando H retorna a zero. Este é o ponto no qual a curva superior B-H corta o eixo y [G]
h_c	- força coerciva, valor de H necessário para mover $B=B_{res}$ para $B=0$. É o ponto no qual a curva superior B-H passa pelo eixo x [Ae/m]
p_{temp}	- especifica a temperatura em que todos os parâmetros acima estão definidos [°C]
tau	- especifica o tempo de atraso entre o campo aplicado e o campo efetivo [s]
b_0	- valor do B inicial de <i>offset</i> [G]
tempc	- especifica a temperatura de operação do <i>template corenl</i> [°C]
units	- seleciona o sistema de unidades (Gaussiano ou SI)

$F_{(I,i)}$; $F_{(II,i)}$	- Força magnetomotriz do enrolamento I e II, respectivamente, para cada coluna i [Ae]
$R_{nu(i)}$, R_{cse} , R_{csd} , R_{cie} e R_{cid}	- Relutâncias não-lineares correspondentes ao núcleo ferromagnético e culatras [Ae/Wb] ou [H^{-1}]
$R_{ex(i)}$	- Relutâncias lineares representando o fluxo de dispersão entre as culatras superior e inferior, para cada coluna [Ae/Wb] ou [H^{-1}]
$R_{d(i)}$	- Relutâncias lineares representando o fluxo de dispersão equivalente entre as bobinas e o núcleo, para cada coluna [Ae/Wb] ou [H^{-1}]
R_{ar}	- Relutâncias lineares representando o fluxo de dispersão entre as bobinas e o ar, para cada coluna [Ae/Wb] ou [H^{-1}]
NC1 até NC7	- Núcleos magnéticos não-lineares, utilizando o <i>template corenl.sin</i>
m1a, m1b, m1c, m2a, m2b, m2c, m2d, m3a, m3b, m3c e m3d	- São pontos de conexão das partes do núcleo que representam todo o espaço do núcleo, com enrolamento e sem enrolamento
ia e a1, ib e b1, ic e c1	- São pinos elétricos que representam a alimentação das bobinas do filtro de seqüência zero, sendo ia, ib e ic utilizando o <i>template fonte.sin</i> e os demais são interligações entre bobinas
LC1 até LC12	- Núcleos magnéticos lineares que representam os fluxos de dispersão através do ar
V	- Tensão fase-fase [V]
S	- Potência trifásica [VA]
l_{cul}	- Comprimento médio das culatras [m]
Z_{disp}	- Impedância de dispersão [Ω]
l_0	- Comprimento médio do caminho magnético do filtro de seqüência zero [m]
H	- Intensidade do campo magnético instantâneo [A/m]

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O termo “Qualidade da Energia Elétrica” está relacionado a uma série de fatores que podem afetar e/ou comprometer a qualidade do projeto e do serviço de suprimento elétrico. Dessa forma, qualquer desvio que possa ocorrer na magnitude, forma de onda ou frequência da tensão e/ou corrente elétrica caracteriza uma rede elétrica com qualidade comprometida.

A má qualidade da energia elétrica pode acarretar grandes impactos nos mais distintos grupos de consumidores, a saber, o residencial, o comercial e o industrial. Estes, à luz de maiores conhecimentos de seus direitos previstos pela legislação e também diante do emprego, cada dia maior, de dispositivos altamente sensíveis aos padrões do suprimento elétrico, já não ignoram que o fornecimento da energia deva, necessariamente, ocorrer na forma de um serviço ou produto que reúna propriedades como: segurança, continuidade, qualidade e outros.

As concessionárias de eletricidade estão, da mesma forma, preocupadas com os problemas envolvendo a qualidade da energia. Atender às expectativas do consumidor e manter sua confiança, por vários motivos, tem gerado grandes motivações junto a empresas. Dentre outros fatores, com os movimentos atuais em direção à competitividade entre as concessionárias, a qualidade do fornecimento da energia torna-se, de fato, muito importante.

Aliada a estes fatores, a existência de uma legislação própria, a qual prevê sanções aos supridores que não adequarem seus serviços aos índices estabelecidos, contribui para o estudo e pesquisa da qualidade da energia com o intuito de conferir uma melhoria nos padrões da qualidade do fornecimento, de forma a assegurar o bom funcionamento dos sistemas elétricos.

Reconhecendo que os distúrbios que determinam os desvios da qualidade da energia, ou mais especificamente, da tensão, são amplamente conhecidos em todos os setores especializados, principalmente no meio acadêmico, considera-se desnecessário tecer maiores comentários sobre os distintos indicadores de qualidade nesta tese. Por tais motivos, as discussões posteriores serão orientadas diretamente ao tema principal da presente pesquisa, qual seja, a questão das distorções harmônicas.

1.2 - CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Dentre os itens que definem uma rede elétrica com má qualidade, as distorções harmônicas presentes na tensão de suprimento e seus efeitos nos diversos equipamentos eletrônicos, têm constituído, nos últimos tempos, assunto que domina os interesses de pesquisas e publicações.

É comum reconhecer que, partindo da barra geradora e caminhando em direção à carga, constata-se um aumento dos níveis de distorção da tensão. Isto se deve, sobremaneira, ao fato que os pontos centrais de geração dos harmônicos se localizam junto às cargas supridas e, muitas vezes, estas são responsáveis por formas de onda de corrente bastante distorcidas [1]. A maioria destes fenômenos ocorre de forma periódica, produzindo componentes múltiplas inteiras da frequência fundamental do sistema. Daí o termo “harmônicos” para descrever a distorção da forma de onda. Complementarmente, quando as componentes de frequência, em tensão ou corrente, não são múltiplos inteiros da frequência fundamental, têm-se as chamadas

inter-harmônicas, que podem se apresentar com frequências discretas ou como larga faixa espectral [57].

Muito embora haja grande divulgação dos conceitos básicos atrelados com esta área de conhecimentos, não é demais lembrar que a distorção harmônica é causada por dispositivos não-lineares localizados no sistema de potência. A figura 1.1 ilustra o caso de uma tensão senoidal aplicada a um simples resistor não-linear, no qual a tensão e a corrente variam de acordo com a curva apresentada. Enquanto a tensão aplicada é puramente senoidal, a corrente resultante é distorcida. Esta situação ilustra o surgimento das distorções harmônicas nos sistemas elétricos.

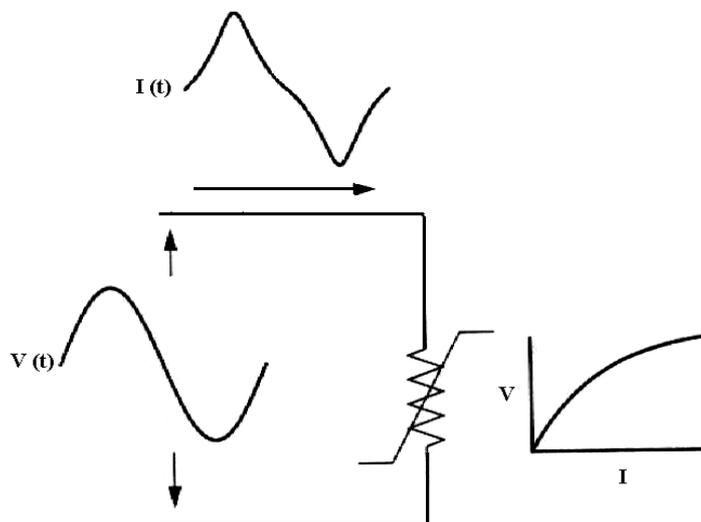


Figura 1.1 - Comportamento tensão x corrente de um dispositivo não-linear

Também, é amplamente conhecido que uma onda não-senoidal pode ser representada como uma somatória de ondas senoidais puras, cada qual constituída por uma frequência múltipla inteira da frequência fundamental da onda original. Esta interpretação advém da conhecida Série de Fourier [2], a qual é graficamente ilustrada na figura 1.2.

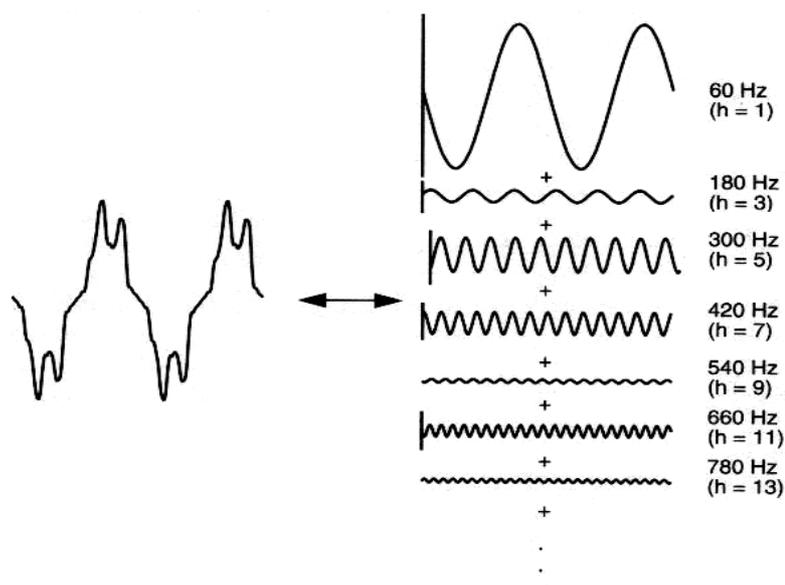


Figura 1.2 - Decomposição de uma forma de onda através da série de Fourier

Tradicionalmente, a literatura trata esse assunto considerando tão somente arranjos monofásicos, fato este não consoante com a realidade operacional da maioria das redes elétricas. Quando se trata de redes com componentes harmônicas, normalmente estão presentes as três seqüências de fase isoladamente para cada ordem harmônica, mesmo em redes equilibradas. Neste particular, o método das componentes simétricas se apresenta como uma excelente ferramenta para a descrição do comportamento de tais arranjos. Este procedimento, também bastante útil nos estudos voltados para a análise de redes, consiste no tratamento de um conjunto de correntes de fase (ou tensões) desbalanceadas em três sistemas balanceados. O primeiro sistema é composto por fasores dispostos a 120° entre si e apresentando seqüência de fase idêntica ao sinal original. O segundo também composto por fasores dispostos a 120° entre si, porém com seqüência de fase oposta ao sinal original. Finalmente, um terceiro sistema representado por um conjunto de fasores com mesmo ângulo de fase. Estas componentes podem advir de sistemas trifásicos operando sob condições equilibradas (com distorções harmônicas) e/ou sob condições desequilibradas.

Como forma de quantificar a presença de distorções harmônicas nos sinais de tensões e/ou correntes, utiliza-se da denominada “Distorção Harmônica Total”, sendo esta uma das designações mais utilizadas no meio técnico/científico. Utilizando de propostas de convenção adotadas em [56], as equações (1.1) e (1.2) sintetizam tais definições:

$$DTHT = \sqrt{\sum_{h>2}^{hmáx} (V_h \%)^2} \quad (1.1)$$

$$DIHT = \sqrt{\sum_{h>2}^{hmáx} (I_h \%)^2} \quad (1.2)$$

onde: *DTHT* - distorção de tensão harmônica total [%];

DIHT - distorção de corrente harmônica total [%];

$V_h \% = 100 \frac{V_h}{V_1}$ - tensão harmônica de ordem *h* em porcentagem da fundamental [%];

V_h - tensão harmônica de ordem *h* [V];

V_1 - tensão fundamental [V];

$I_h \% = 100 \frac{I_h}{I_1}$ - corrente harmônica de ordem *h* em porcentagem da fundamental [%];

I_h - corrente harmônica de ordem *h* [A];

I_1 - corrente fundamental [A].

Reconhecendo os efeitos negativos causados pelas componentes harmônicas de tensão e/ou corrente na rede elétrica e seus componentes, bem como objetivando manter os níveis de distorção dentro dos limites recomendados, surge a necessidade de medidas preventivas ou corretivas para a redução dos níveis de harmônicos presentes nos barramentos e linhas de um complexo elétrico. Dentro deste contexto, surge esta tese, a qual enfoca métodos para a filtragem de correntes harmônicas de seqüência zero, positiva e negativa, descritos, com mais detalhes, no decorrer deste trabalho.

1.3 - ESTADO DA ARTE

Várias pesquisas e publicações têm sido encontradas com relação ao assunto filtros harmônicos e, portanto, neste momento, torna-se necessário relatar os resultados dos trabalhos de levantamentos bibliográficos executados.

Neste contexto, é possível encontrar diversas técnicas para reduzir os sinais harmônicos de tensão e/ou corrente. Estas, de um modo global, podem ser agrupadas nas estratégias abaixo caracterizadas:

- Uso de filtros passivos conectados em paralelo e/ou em série [3-18];
- Inserção de reator em série na linha c.a. [19];
- Aumento da quantidade de pulsos em unidades conversoras, com o uso de transformadores defasadores [9], [20-25];
- Técnicas de compensação de fluxo magnético [26-27];
- Filtros ativos de potência conectados em paralelo e/ou em série [17], [28-45];
- Uso de dispositivos eletromagnéticos [15], [22-24], [46-51];

A escolha de um ou outro procedimento, ou mesmo, a associação de soluções, deve levar em conta a análise dos seguintes aspectos:

- Conhecimento do sistema de alimentação do ponto de vista da concessionária: impedância de curto-circuito, nível de tensão e legislação quanto aos níveis de distorções harmônicas permitidos;
- Conhecimento do sistema consumidor: tipos de cargas instaladas, potência envolvida, problemas que ocorrem devido aos harmônicos, perda de energia, diminuição do fator de potência real;
- Local da instalação do dispositivo para redução de harmônicos;

- Desempenho e capacidade nominal de tensão/corrente do dispositivo;
- Custo inicial de compra e custo da energia consumida no próprio dispositivo;
- Efeitos colaterais prejudiciais sobre o sistema de alimentação: o fator de potência em situações de carga nominal pode se alterar inconvenientemente em condições de carga baixa, modificação do nível e da distorção de tensão ou de corrente, alteração do nível de curto-circuito para a terra, mudança ou possibilidade de ressonância em outras frequências harmônicas. Em decorrência desses, pode haver possíveis efeitos nocivos sobre outras cargas consumidoras adjacentes;
- Efeitos colaterais prejudiciais ao funcionamento das cargas elétricas envolvidas: aumento da distorção de tensão de alimentação da carga, sua queda ou sua elevação;
- Influências nocivas das variações do sistema sobre o dispositivo utilizado: alterações da impedância do sistema, correntes harmônicas de cargas consumidoras adjacentes podem entrar pela alimentação, o sistema pode desequilibrar-se em tensão, a distorção de tensão e o seu nível na barra de alimentação podem variar devido a fatores externos;
- Influência da carga sobre a técnica utilizada: a variação da potência solicitada pela carga e a presença de desequilíbrios podem alterar o funcionamento do dispositivo empregado para a redução de harmônicos.

Dentre as alternativas relatadas como possíveis estratégias para a eliminação/redução das correntes harmônicas, aquelas associadas aos filtros ativos, passivos e eletromagnéticos são, comumente, as mais empregadas. Devido a este fato, estas três metodologias serão consideradas com mais detalhes na seqüência.

Os filtros passivos são formados a partir de várias combinações dos elementos tipo R, L e C, podendo ser conectados em paralelo ou em série ao sistema elétrico. Aqueles conectados

em paralelo (derivação, ou *shunt*), têm sido amplamente estudados e aplicados em sistemas elétricos [3-11]. Ao longo de vários anos, devido a fatores científicos, tecnológicos e econômicos, esta tem se firmado como a solução mais tradicional para a redução de harmônicos. Estes dispositivos podem ser classificados em dois grupos: sintonizados e amortecidos. Os filtros em derivação sintonizados são baseados no fenômeno da ressonância, que deve ocorrer para uma ou mais frequências harmônicas a serem eliminadas, apresentando, nesta situação, uma baixa impedância resistiva para as mesmas. Os filtros em derivação amortecidos são constituídos por circuitos que oferecem uma baixa impedância ao longo de uma larga faixa de frequência, [3-6], [9]. Na prática, são encontradas configurações que combinam o uso de filtros sintonizados para ordens harmônicas individuais (até a 13^a, por exemplo) e amortecidos para as frequências superiores [9]. Uma outra função dos filtros sintonizados e amortecidos é que, para as frequências abaixo da frequência de ressonância, apresentam-se como circuitos capacitivos, sendo, portanto, compensadores de energia reativa na frequência fundamental. Embora estes filtros sejam usados normalmente em sistemas de potência, têm-se, em [15], um exemplo de aplicação e análise de um filtro sintonizado no ponto de conexão de cargas não-lineares monofásicas de pequena potência.

Por outro lado, os filtros passivos conectados em série têm sido bem menos enfocados para a filtragem harmônica do que aqueles filtros conectados em derivação, o que pode ser justificado através dos seguintes motivos:

- Produção de correntes harmônicas por parte das cargas não-lineares seria inibida no seu ponto de origem, afetando, assim, a operação da carga geradora do distúrbio;
- Dificuldades relacionadas com o isolamento elétrico dos componentes L e C;
- Altas distorções de tensão nos terminais de saída do filtro;
- Condução de toda a corrente de carga, apresentando, por conseguinte, maior custo dos componentes e da instalação.

Uma alternativa para diminuir a distorção harmônica das correntes consiste na utilização de filtros ativos, constituídos por componentes eletrônicos de potência e de controle analógico e/ou digital. Esta proposta tem evoluído notavelmente, sobretudo a partir de 1980.

Os tipos básicos de filtros ativos são: paralelo, série, série/paralelo combinados e híbridos (que combinam técnicas ativas e passivas). Os métodos de operação dos filtros ativos atuais são fundamentados na teoria das potências ativa e reativa instantâneas [33], [34].

Os filtros ativos paralelos atuam através de um processo de detecção, sintetização e aplicação de correntes harmônicas contrárias àquelas produzidas pela carga não-linear, podendo ainda atuar sobre a corrente na frequência fundamental, promovendo a compensação reativa [26, 35-38]. Um filtro ativo paralelo típico é composto basicamente por um inversor de tensão ou de corrente, acionado por técnicas específicas de controle [32].

Como mencionado, a combinação de filtros ativos série/paralelo também se apresenta como um procedimento para o controle de harmônicos. Neste particular, a referência [42] apresenta um dispositivo para a compensação simultânea de tensão e corrente, denominado por UPQC (*Unified Power Quality Conditioner*), sendo esta denominação advinda do fato que seu circuito de potência se apresenta de modo similar ao do UPFC (*Unified Power Flow Controller*) [38]. Nesta mesma linha [43], [44] propuseram o compensador universal UPLC (*Universal Active Power Line Conditioner*) que engloba todos os conceitos associados com o UPFC e o UPQC num único equipamento.

Por fim, tem-se a associação dos filtros passivos com os filtros ativos, chamados de filtros híbridos. Esta solução ocorre no sentido de reduzir o custo inicial da instalação e obtenção de maior eficiência na diminuição do conteúdo harmônico [38], [39], [41].

De uma maneira geral, a utilização de filtros ativos para o controle de distorções harmônicas de tensão e/ou corrente se apresenta como opção eficiente para tal fim,

apresentando, porém, altos custos de implantação e manutenção, inviabilizando, em algumas situações, o uso dos mesmos.

Na seqüência são considerados os dispositivos voltados para a compensação de harmônicos baseados em princípios eletromagnéticos. Muito embora a escassa citação bibliográfica sobre esta técnica, ressalta-se que as referências [21], [22] apresentam uma configuração do sistema de energia utilizando transformadores defasadores para a mitigação das correntes harmônicas de seqüência positiva, negativa e zero. Uma outra estratégia eletromagnética remete ao emprego de um dispositivo capaz de promover uma baixa impedância de seqüência zero, conectado em paralelo com a carga não-linear. Em [24], uma configuração para o filtro eletromagnético de seqüência zero é apresentada, todavia, sem tecer maiores comentários construtivos ou operacionais. Em [46] são apresentados resultados computacionais e experimentais bastante consistentes da utilização de um filtro de seqüência zero conectado em um sistema elétrico contendo retificadores monofásicos como cargas harmônicas. Esta referência apresenta comparações de desempenho desse filtro diante de diferentes impedâncias do sistema elétrico da qual faz parte e também diante de um desequilíbrio na tensão de suprimento. Avançando nesta direção, as referências [47], [48] apresentam uma alternativa para o aumento da eficiência deste filtro de seqüência zero, através do uso de um arranjo conectado em série com a carga não-linear, chamado bloqueador de seqüência zero. Este tem o objetivo de aumentar a impedância de seqüência zero do sistema de alimentação, facilitando, por conseguinte, o caminho de corrente de seqüência zero através do filtro em questão. Visando observar o desempenho de filtros de seqüência zero quando da presença de condições não-ideais de suprimento ou carga alimentada, surge a referência [49], a qual enfoca, computacionalmente, diferentes condições elétricas do sistema, quais sejam: carga não-linear trifásica desequilibrada, carga não-linear monofásica, tensão de alimentação desequilibrada e tensão de alimentação distorcida. De uma maneira geral, todas

as condições não-ideais apresentadas alteraram, de forma negativa, a operação do filtro de seqüência zero, desequilibrando as correntes de fase e facilitando o sobreaquecimento do filtro, através da filtragem de componentes de seqüência zero de outras ordens harmônicas diferentes daquelas múltiplas de 3.

Enfocando a filtragem de harmônicas de seqüência positiva e negativa através de dispositivos eletromagnéticos, as referências [50], [51] propõem um transformador com ligação delta/estrela [50] e delta/zigue-zague [51] como interconexão entre o lado CA e o lado CC de um retificador de 6 pulsos (carga não-linear). Para ambos os casos, o retificador deve possuir uma estrutura topológica que atenda os requisitos do sistema de filtragem harmônica, podendo ser inviável em instalações já em funcionamento. Somado a isto, as soluções indicadas nas mencionadas referências pressupõem o uso de estruturas magnéticas envolvendo dois enrolamentos, sendo que, no caso da referência [51], é utilizada uma conexão zigue-zague, comprometendo significativamente o custo de implantação destas metodologias.

Buscando, pois, alternativas para a filtragem de harmônicas através de dispositivos eletromagnéticos, surge esta tese, a qual contempla os princípios físicos, a modelagem computacional, a análise de desempenho e outros aspectos relacionados com dois equipamentos compensadores, um voltado para as componentes harmônicas de seqüência zero e outro para o controle das distorções atreladas com as componentes de seqüência positiva e negativa.

1.4 - CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA TESE

Uma vez contextualizado o tema e estabelecidas as diretrizes que nortearam a concepção e os desenvolvimentos da presente pesquisa, vale ressaltar que os trabalhos aqui

focados oferecem as seguintes contribuições direcionadas ao domínio da tecnologia dos equipamentos mitigadores de harmônicos utilizando dispositivos eletromagnéticos:

- Concepção construtiva e estabelecimento dos princípios funcionais de duas vertentes para filtros eletromagnéticos, a saber: filtros para harmônicos de seqüência zero e filtros para harmônicos de seqüência positiva e negativa;
- Modelagem computacional destes dispositivos através de técnicas de representação no domínio do tempo e avaliação do desempenho dos produtos sob condições ideais e não-ideais para a rede e carga compensada, empregando-se para tanto recursos fundamentados em relutâncias e forças magnetomotrizes;
- Validação experimental através de montagens laboratoriais utilizando protótipos dos produtos contemplados nesta pesquisa, focando o funcionamento e a eficácia dos dispositivos sob condições ideais e não-ideais da rede e da carga;
- Caracterização dos fatores de influência que determinam a eficácia do processo de compensação através dos arranjos eletromagnéticos considerados na pesquisa e indicação de mecanismos para a melhoria de desempenho dos filtros.

1.5 - ESTRUTURA DA TESE

Diante das propostas supramencionadas, além do presente capítulo introdutório, a tese será desenvolvida obedecendo a seguinte estrutura:

Capítulo II – Concepções físicas para os filtros eletromagnéticos.

Este capítulo encontra-se direcionado à apresentação dos arranjos físicos e

eletromagnéticos para as alternativas de filtragem harmônicas aqui consideradas, ou seja, o filtro de seqüência zero e o filtro de seqüência positiva e negativa, seus princípios de funcionamento, além da fundamentação matemática envolvendo os mesmos.

Capítulo III – Modelagem dos filtros eletromagnéticos.

Esta seção está voltada para a escolha da estratégia de modelagem a ser utilizada nos estudos, discussão de aspectos correlatos à modelagem da não-linearidade magnética e, por fim, a modelagem dos filtros eletromagnéticos sob enfoque.

Capítulo IV – Validação dos modelos de filtros eletromagnéticos.

Esta unidade destina-se à apresentação e discussão dos testes de desempenho dos filtros eletromagnéticos quando submetidos a um sistema elétrico sob condições ideais de funcionamento. Em sua essência, o presente capítulo encontra-se direcionado à correlação entre os resultados experimentais advindos da instalação de protótipos de filtros em estruturas físicas laboratoriais e aqueles provenientes das simulações computacionais

Capítulo V – Fatores de influência no desempenho dos filtros eletromagnéticos.

Este capítulo contempla investigações sobre os fatores capazes de alterar a eficiência dos filtros eletromagnéticos quando estes dispositivos

encontram-se inseridos em redes elétricas em que o suprimento e a carga sofrem mudanças em relação às condições idealizadas. Nestes termos, o capítulo não apenas esclarece sobre a relação supra mencionada, mas também destaca soluções objetivando a garantia do processo de compensação nos termos almejados.

Capítulo VI – Conclusões gerais.

Por fim, a apresentação das principais discussões e conclusões gerais dos capítulos que formam o corpo desta tese são destacadas nesta fase final do trabalho. Além disso, serão ressaltadas questões associadas às principais contribuições deste trabalho, bem como sugestões para futuros desenvolvimentos.

CONCEPÇÕES FÍSICAS PARA OS FILTROS ELETROMAGNÉTICOS

2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Como estabelecido no capítulo inicial, uma das formas para a atenuação da injeção de componentes harmônicas de corrente em redes elétricas de suprimento fundamenta-se no emprego de dispositivos eletromagnéticos. Estes, uma vez concebidos, projetados e construídos em consonância com seus objetivos específicos, podem ser classificados em dois grandes grupos: um primeiro voltado para o controle das componentes de seqüência zero [24, 46-49] e um segundo destinado à atenuação das componentes de seqüência positiva e negativa [50], [51].

Enfocando, inicialmente, a filtragem das correntes harmônicas de seqüência zero, esta tese encontra-se direcionada ao emprego da estratégia destacada em [46]. Esta consiste no uso de enrolamentos eletromagnéticos interligados em zigue-zague, com os quais se consegue um dispositivo capaz de oferecer um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas de seqüência zero.

Por outro lado, a filtragem das componentes de seqüência positiva e negativa tem como fundamentação o uso de um reator a núcleo saturado. Este, uma vez levado à níveis de saturação capazes de produzir correntes harmônicas de mesma amplitude e ângulos de fase

opostos àquelas geradas através de uma determinada carga não-linear já instalada, oferecerá a propriedade almejada.

Enfocando, pois, estas duas concepções de filtragem harmônica, este capítulo tem por objetivo:

- Apresentar o princípio físico de funcionamento dos filtros eletromagnéticos de seqüência zero, positiva e negativa, com destaque aos seus aspectos da concepção física construtiva;
- Estabelecer as bases matemáticas que mostram a operacionalidade dos filtros harmônicos supramencionados;
- Avaliar a operacionalidade do filtro de seqüência positiva e negativa dentro do contexto da adequação da magnitude e do defasamento angular das componentes harmônicas de correntes produzidas.

2.2 - ARRANJOS FÍSICOS E APLICAÇÕES

Na seqüência são apresentados os princípios físicos e potencialidades aplicativas para as duas propostas de filtros anteriormente destacadas.

2.2.1 - FILTRO DE CORRENTES DE SEQÜÊNCIA ZERO

A figura 2.1 ilustra uma instalação típica constituída por uma rede elétrica genérica, possuindo uma carga geradora de harmônicas e a presença de um filtro de seqüência zero. Este arranjo permite visualizar o princípio do mecanismo da eliminação das componentes harmônicas de corrente de seqüência zero. Como se vê, o propósito maior do filtro está em

prover meios para que as mencionadas componentes harmônicas fiquem restritas ao circuito composto pela carga e o filtro propriamente dito. Em outras palavras, assim como para o caso dos filtros passivos convencionais, não ocorre a alteração do conteúdo harmônico produzido pela carga, mas sim, um desvio em seu caminho de circulação inibindo, ao máximo, sua injeção na rede de suprimento.

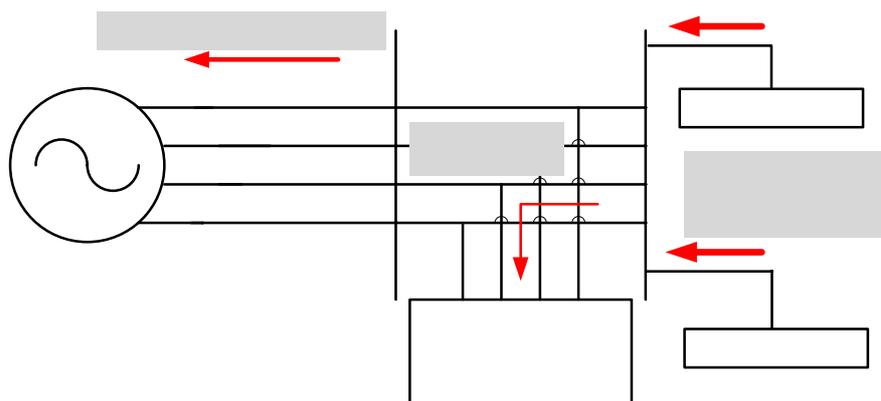


Figura 2.1 - Instalação típica do filtro eletromagnético de seqüência zero

(a) Fundamentação operacional

5°, 7°, 11°, 13° harmônicos

A partir da figura 2.1, é possível observar que o desempenho do filtro possui forte dependência com a relação entre a sua impedância e a impedância do sistema, como sugere o circuito equivalente simplificado de seqüência zero ilustrado na figura 2.2.

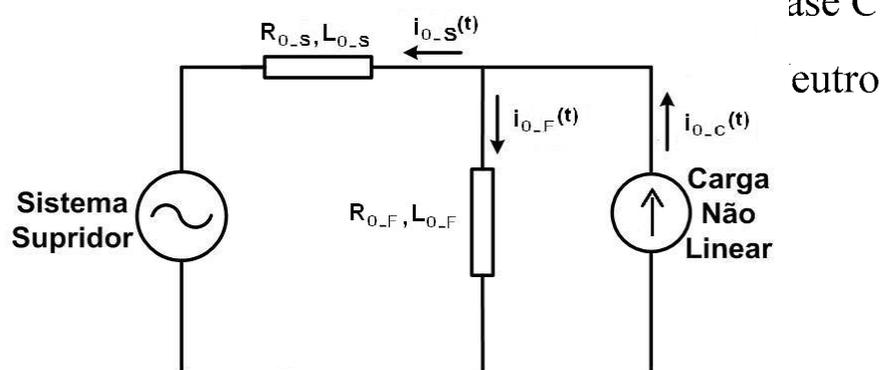


Figura 2.2 - Circuito equivalente: alimentação, carga e filtro de seqüência zero

A partir do divisor de corrente identificado na figura 2.2, constata-se que a corrente que se estabelece através do filtro eletromagnético de seqüência zero é dada por:

$$i_{0_F}(t) = \frac{Z_{0_S}}{Z_{0_S} + Z_{0_F}} \cdot i_{0_C}(t) \quad (2.1)$$

Sendo:

$i_{0_C}(t)$ - Corrente de seqüência zero gerada pela carga não-linear;

$i_{0_F}(t)$ - Corrente de seqüência zero através do filtro de seqüência zero;

Z_{0_S} - Impedância de seqüência zero do sistema de suprimento (R_{0_S}, L_{0_S});

Z_{0_F} - Impedância de seqüência zero do filtro de seqüência zero (R_{0_F}, L_{0_F}).

A equação (2.1) revela que, quanto menor a impedância de seqüência zero do filtro, em relação à mesma impedância do sistema de alimentação, maior será sua eficiência em drenar as correntes harmônicas de seqüência zero.

Por outro lado, a corrente injetada na rede de suprimento, com a inserção do filtro em paralelo, pode ser calculada por:

$$i_{0_S}(t) = \frac{Z_{0_F}}{Z_{0_F} + Z_{0_S}} \cdot i_{0_C}(t) \quad (2.2)$$

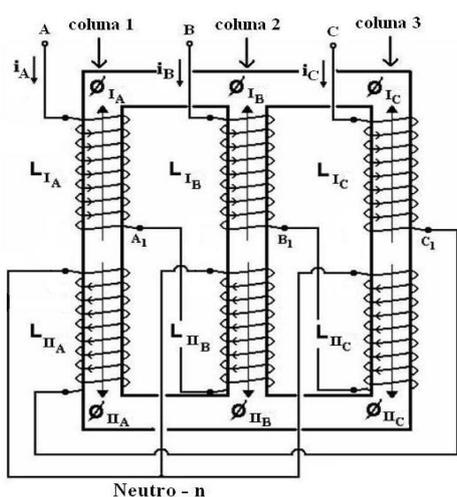
Sendo:

$i_{0_S}(t)$ - Corrente de seqüência zero injetada no sistema.

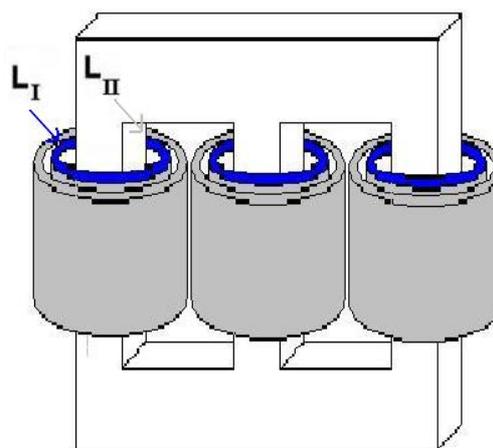
Mais uma vez, a equação (2.2) evidencia que a corrente de seqüência zero que se estabelece no sistema de suprimento será tão menor quanto maior a impedância de seqüência zero do sistema quando comparada com a impedância de seqüência zero do filtro. Esta situação nem sempre pode ser encontrada na prática, pois dependerá fortemente do local onde o filtro é instalado no sistema elétrico.

(b) Fundamentação matemática

No que tange ao arranjo trifásico para o filtro em questão, conforme indicado em [46], este é constituído por um núcleo trifásico de 3 colunas junto aos quais são inseridos, por fase, dois conjuntos de bobinas com polaridades opostas. Conectando-se tais enrolamentos de acordo com a clássica designação zigue-zague, obtém-se a composição ilustrada na seqüência através das figuras 2.3 e 2.4. Nas mesmas figuras ficam ainda esclarecidas as convenções utilizadas para a representação dos efeitos magnéticos dos diferentes acoplamentos e de dispersão.

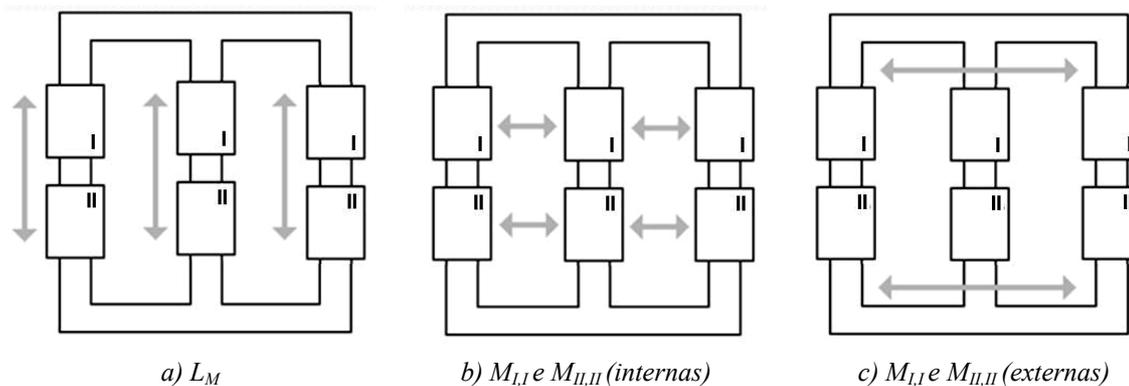


(a) Arranjo didático



(b) Arranjo real

Figura 2.3 - Arranjo físico trifásico do filtro eletromagnético de seqüência zero



a) L_M

b) $M_{I,I}$ e $M_{II,II}$ (internas)

c) $M_{I,I}$ e $M_{II,II}$ (externas)

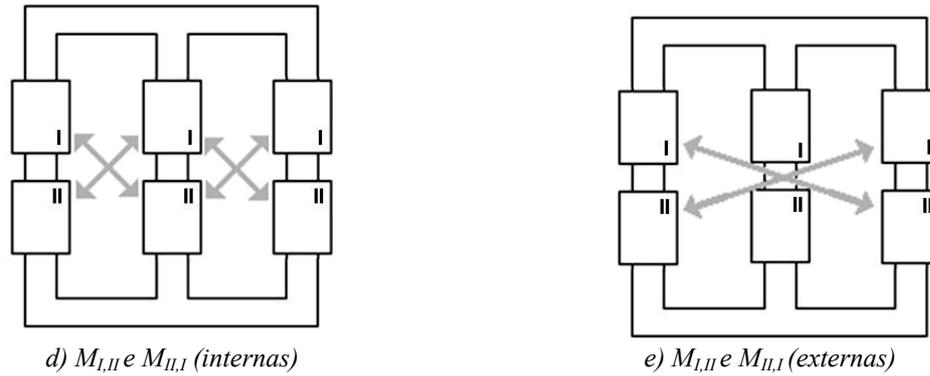


Figura 2.4 - Indutâncias mútuas presentes no filtro eletromagnético de seqüência zero

Sendo:

- $L_{I,1}$; $L_{I,2}$; $L_{I,3}$ - Indutância própria do enrolamento I das colunas 1, 2 e 3, respectivamente;
- $L_{II,1}$; $L_{II,2}$; $L_{II,3}$ - Indutância própria do enrolamento II das colunas 1, 2 e 3, respectivamente;
- L_M - Indutância mútua entre os enrolamentos I e II de mesma coluna;
- $M_{I,I}$ - Indutâncias mútuas entre os enrolamentos I nas três colunas;
- $M_{II,II}$ - Indutâncias mútuas entre os enrolamentos II nas três colunas;
- $M_{I,II}$ e $M_{II,I}$ - Indutâncias mútuas entre os enrolamentos I e II transversais nas três colunas;
- $\Phi_{I,1}$; $\Phi_{I,2}$; $\Phi_{I,3}$ - Fluxo referente ao enrolamento I das colunas 1, 2 e 3, respectivamente;
- $\Phi_{II,1}$; $\Phi_{II,2}$; $\Phi_{II,3}$ - Fluxo referente ao enrolamento II das colunas 1, 2 e 3, respectivamente.

Sob o ponto de vista magnético, a composição física anterior pode ser ilustrada na forma indicada na figura 2.5.

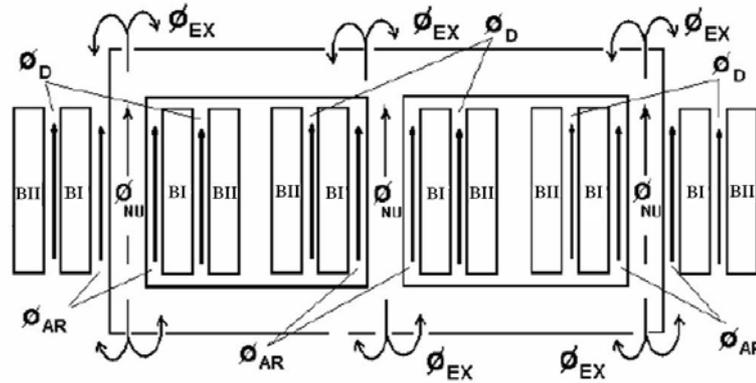


Figura 2.5 - Distribuição magnética de fluxos para o filtro de seqüência zero

Onde:

- Φ_D - fluxo de dispersão entre o enrolamento I e II;
- Φ_{AR} - fluxo pelo caminho de ar entre o núcleo e o enrolamento I;
- Φ_{EX} - fluxo entre a culatra superior e a culatra inferior através do ar e/ou tanque;
- Φ_{NU} - fluxo que circula pelo material ferromagnético.

Como pode ser visto, cada coluna é enlaçada por dois enrolamentos, denominados por I e II, construídos com o mesmo número de espiras e ligados em zig-zague. Desta forma, cada coluna magnética apresentará uma força magnetomotriz (FMM) resultante de duas fontes, as quais combinam os correspondentes efeitos da corrente de linha. Esta interação, aliada às considerações construtivas e operacionais do sistema elétrico, deve conduzir a um caminho de baixa impedância para as componentes de seqüência zero. O motivo disto está atrelado ao fato que esta impedância irá concorrer com a impedância do sistema de fornecimento, servindo como caminho alternativo às correntes enfocadas.

Nestas condições, as tensões nas bobinas I das fases A, B e C são dadas por:

$$V_{A_{A1}}(t) = L_{I_A} \cdot \frac{di_A}{dt} + M_{I,II_{AB}} \cdot \frac{di_A}{dt} + M_{I,II_{AC}} \cdot \frac{di_B}{dt} - L_{M_A} \cdot \frac{di_C}{dt} - M_{I,I_{AB}} \cdot \frac{di_B}{dt} - M_{I,I_{AC}} \cdot \frac{di_C}{dt} \quad (2.3)$$

$$V_{B_{B1}}(t) = L_{I_B} \cdot \frac{di_B}{dt} + M_{I,II_{BC}} \cdot \frac{di_B}{dt} + M_{I,II_{BA}} \cdot \frac{di_C}{dt} - L_{M_B} \cdot \frac{di_A}{dt} - M_{I,I_{BA}} \cdot \frac{di_A}{dt} - M_{I,I_{BC}} \cdot \frac{di_C}{dt} \quad (2.4)$$

$$V_{C_{C1}}(t) = L_{I_C} \cdot \frac{di_C}{dt} + M_{I,II_{CA}} \cdot \frac{di_C}{dt} + M_{I,II_{CB}} \cdot \frac{di_A}{dt} - L_{M_C} \cdot \frac{di_B}{dt} - M_{I,I_{CA}} \cdot \frac{di_A}{dt} - M_{I,I_{CB}} \cdot \frac{di_B}{dt} \quad (2.5)$$

Matricialmente, empregando técnicas de modelagem no domínio da frequência, para uma ordem harmônica genérica h , tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{AAI} \\ \dot{V}_{BB1} \\ \dot{V}_{CCI} \end{bmatrix}_h = j\omega h \cdot \begin{bmatrix} (L_{I_A} + M_{I,II_{AB}}) & -(M_{I,I_{AB}} - M_{I,II_{AC}}) & -(L_{M_A} + M_{I,I_{AC}}) \\ -(L_{M_B} + M_{I,I_{BA}}) & (L_{I_B} + M_{I,II_{BC}}) & -(M_{I,I_{BC}} - M_{I,II_{BA}}) \\ -(M_{I,I_{CA}} - M_{I,II_{CB}}) & -(L_{M_C} + M_{I,I_{CB}}) & (L_{I_C} + M_{I,II_{CA}}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix}_h \quad (2.6)$$

Analogamente, as tensões nas bobinas II das fases A, B e C, na forma matricial, para uma ordem genérica h , podem ser expressas por:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{AI_n} \\ \dot{V}_{BI_n} \\ \dot{V}_{CI_n} \end{bmatrix}_h = j\omega h \cdot \begin{bmatrix} (L_{II_B} + M_{II,I_{BA}}) & -(L_{M_B} + M_{II,II_{BC}}) & -(M_{II,II_{BA}} - M_{II,I_{BC}}) \\ -(M_{II,II_{CB}} - M_{II,I_{CA}}) & (L_{II_C} + M_{II,II_{CB}}) & -(L_{M_C} + M_{II,II_{CA}}) \\ -(L_{M_A} + M_{II,II_{AB}}) & -(M_{II,II_{AC}} - M_{II,I_{AB}}) & (L_{II_A} + M_{II,I_{AC}}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix}_h \quad (2.7)$$

No que tange às tensões nas fases A, B e C, estas podem ser dadas por:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{A_n} \\ \dot{V}_{B_n} \\ \dot{V}_{C_n} \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} \dot{V}_{AAI} \\ \dot{V}_{BB1} \\ \dot{V}_{CCI} \end{bmatrix}_h + \begin{bmatrix} \dot{V}_{AI_n} \\ \dot{V}_{BI_n} \\ \dot{V}_{CI_n} \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} Z_{AA} & -Z_{AB} & -Z_{AC} \\ -Z_{BA} & Z_{BB} & -Z_{BC} \\ -Z_{CA} & -Z_{CB} & Z_{CC} \end{bmatrix}_h \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix}_h \quad (2.8)$$

Onde:

$$Z_{AA} = j\omega h \cdot (L_{I_A} + L_{II_B} + M_{I,II_{AB}} + M_{II,I_{BA}}) \quad (2.9)$$

$$Z_{BB} = j\omega h \cdot (L_{I_B} + L_{II_C} + M_{I,II_{BC}} + M_{II,I_{CB}}) \quad (2.10)$$

$$Z_{CC} = j\omega h \cdot (L_{I_C} + L_{II_A} + M_{I,II_{CA}} + M_{II,I_{AC}}) \quad (2.11)$$

Admitindo-se que as bobinas I e II sejam idênticas, tem-se:

$$L_{I_A} = L_{I_B} = L_{I_C} = L_{II_A} = L_{II_B} = L_{II_C} = L \quad (2.12)$$

Considerando-se, ainda, a operação do filtro na região linear, tem-se: $M_{I,II_{BC}} = M_{I,II_{CB}}$,

$$M_{I,II_{BA}} = M_{I,II_{AB}} \text{ e } M_{I,II_{CA}} = M_{I,II_{AC}}.$$

Logo;

$$Z_{AA} = 2j\omega h \cdot (L + M_{I,II_{AB}}) \quad (2.13)$$

$$Z_{BB} = 2j\omega h \cdot (L + M_{I,II_{BC}}) \quad (2.14)$$

$$Z_{CC} = 2j\omega h.(L + M_{I,II_{CA}}) \quad (2.15)$$

Sob condições idealizadas, é ainda possível aplicar outras simplificações baseadas na similaridade construtiva dos enrolamentos e simetrias do núcleo. Considerando-se, pois a simetria construtiva é factível admitir que as indutâncias mútuas entre os enrolamentos I e II das colunas adjacentes e não-adjacentes do núcleo magnético, ilustradas na figura 2.4 (d) e (e), sejam iguais. Neste caso, tem-se:

$$M_{I,II_{AB}} = M_{I,II_{BC}} = M_{I,II_{adj}} \quad (2.16)$$

$$M_{I,II_{AC}} = M_{I,II_{ext}} \quad (2.17)$$

Logo;

$$Z_{AA} = Z_{BB} = 2j\omega h(L + M_{I,II_{adj}}) \quad (2.18)$$

$$Z_{CC} = 2j\omega h(L + M_{I,II_{ext}}) \quad (2.19)$$

Os aspectos geométricos e construtivos idealizados ainda sugerem que as indutâncias mútuas entre os enrolamentos de uma mesma coluna, figura 2.4 (a), possam ser considerados idênticos, sendo então:

$$L_{M_A} = L_{M_B} = L_{M_C} = L_M \quad (2.20)$$

O mesmo se aplica as indutâncias mútuas entre os enrolamentos I e entre os enrolamentos II das colunas adjacentes e não-adjacentes do núcleo, sendo, portanto:

$$M_{I,I_{AB}} = M_{I,I_{BC}} = M_{I,I_{(adj)}} \quad (2.21)$$

$$M_{II,II_{AB}} = M_{II,II_{BC}} = M_{II,II_{(adj)}} \quad (2.22)$$

$$M_{I,I_{AC}} = M_{I,I_{(ext)}} \quad (2.23)$$

$$M_{II,II_{AC}} = M_{II,II_{(ext)}} \quad (2.24)$$

Nestas condições, tem-se:

$$Z_{AB} = j\omega h.(L_M + M_{I,I_{(adj)}} + M_{II,II_{(adj)}} - M_{I,II_{(ext)}}) \quad (2.25)$$

$$Z_{AC} = j\omega h.(L_M + M_{I,I_{(ext)}} + M_{II,II_{(adj)}} - M_{I,II_{(adj)}}) \quad (2.26)$$

$$Z_{BC} = j\omega h.(L_M + M_{I,I_{(adj)}} + M_{II,II_{(ext)}} - M_{I,II_{(adj)}}) \quad (2.27)$$

As condições simplificadoras adotadas até o momento foram alicerçadas na simetria construtiva do núcleo e dos enrolamentos I e II. Esta hipótese é factível de obtenção através de sistemáticas construtivas e sob tais circunstâncias pode-se escrever:

$$M_{I,I(adj)} = M_{II,II(adj)} = M_{II,I(adj)} = M_{adj} \quad (2.28)$$

$$M_{I,I(ext)} = M_{II,II(ext)} = M_{II,I(ext)} = M_{ext} \quad (2.29)$$

Substituindo-se nas equações anteriores tem-se;

$$Z_{AA} = Z_{BB} = 2j\omega h(L + M_{adj}) = Z \quad (2.30)$$

$$Z_{CC} = 2j\omega h.(L + M_{ext}) = Z^* \quad (2.31)$$

$$Z_{BA} = Z_{AB} = j\omega h.(L_M + 2M_{adj} - M_{ext}) = Z_M \quad (2.32)$$

$$Z_{AC} = Z_{CA} = Z_{BC} = Z_{CB} = j\omega h.(L_M + M_{ext}) = Z'_M \quad (2.33)$$

Portanto:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{A_n} \\ \dot{V}_{B_n} \\ \dot{V}_{C_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z & -Z_M & -Z'_M \\ -Z_M & Z & -Z'_M \\ -Z'_M & -Z'_M & Z^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Utilizando uma notação compacta, para cada múltiplo h da frequência base considerada, pode-se escrever: $\dot{V}_{ABC} = Z.\dot{I}_{ABC}$

Em componentes simétricas: $\dot{V}_{ABC} = T.\dot{V}_{012}$ e $\dot{I}_{ABC} = T.\dot{I}_{012}$, sendo T a matriz de transformação de componentes de simétricos para componentes de fase.

Substituindo as duas últimas equações, obtém-se:

$$T.\dot{V}_{012} = Z.T.\dot{I}_{012} \quad (2.35)$$

Pré-multiplicando a expressão pela matriz de transformação inversa, vem:

$$\dot{V}_{012} = Z_{012}\dot{I}_{012} \quad (2.36)$$

Onde: $Z_{012} = T^{-1}.Z.T$

A matriz que relaciona as componentes seqüenciais de tensão e corrente (Z_{012}) passa então a ser dada por:

$$\mathbf{Z}_{012} = \begin{bmatrix} Z_0 & -\alpha Z_m & -\alpha^2 Z_m \\ -\alpha^2 Z_m & Z_F & -\alpha Z'_m \\ -\alpha Z_m & -\alpha^2 Z'_m & Z_F \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Onde:

$$Z_0 = \frac{1}{3}(2Z + Z^* - 2Z_M - 4Z'_M)$$

$$Z_F = \frac{1}{3}(2Z + Z^* + Z_M + 2Z'_M)$$

$$Z_m = \frac{1}{3}(Z - Z^* - Z_M + Z'_M)$$

$$Z'_m = \frac{1}{3}(Z - Z^* + 2Z_M - 2Z'_M)$$

A equação (2.37) sugere a existência de circuitos seqüenciais acoplados, como mostrado na figura 2.6. Nestas condições, os circuitos seqüenciais não podem ser tratados individualmente, pois existe uma dependência mútua entre as correntes e tensões nas diferentes seqüências de fase.

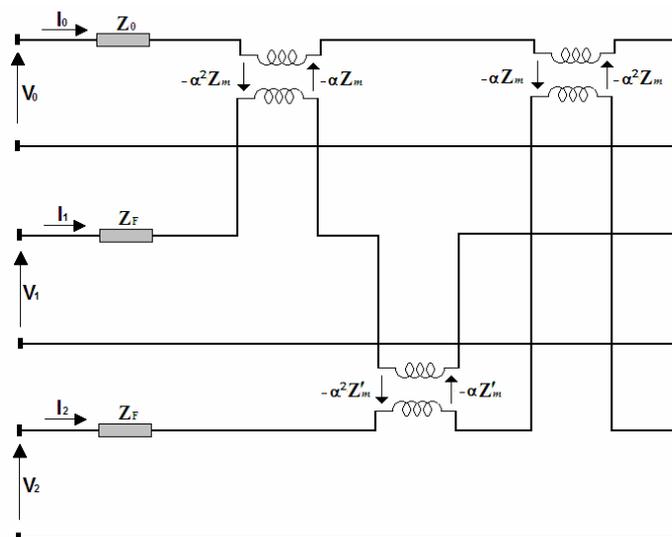


Figura 2.6 - Circuitos seqüenciais acoplados para o filtro de seqüência zero

Não obstante os desenvolvimentos anteriores, os quais concluíram pelo estabelecimento de relações matemáticas gerais, pode-se, neste momento, introduzir princípios simplificadores adicionais objetivando uma estrutura não-acoplada entre as seqüências de fase. Para contemplar esta propriedade, adota-se uma igualdade numérica entre as indutâncias mútuas adjacentes e externas das colunas. Isto resulta na equação (2.38).

$$M_{adj} = M_{ext} = M \quad (2.38)$$

Assim sendo:

$$Z = Z^* = 2j\omega h.(L + M) \quad (2.39)$$

$$Z_M = Z'_M = j\omega h.(L_M + M) \quad (2.40)$$

Assim sendo:

$$Z_0 = Z - 2Z_M = 2j\omega h(L - L_M) \quad (2.41)$$

$$Z_F = Z + Z_M = j\omega h.(2L - L_M + M) \quad (2.42)$$

$$Z_M = Z'_M = 0 \quad (2.43)$$

Nestas condições as correntes e tensões seqüências se relacionam por:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = j\omega h \begin{bmatrix} 2(L-L_M) & 0 & 0 \\ 0 & 2L-L_M+M & 0 \\ 0 & 0 & 2L-L_M+M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

A equação (2.44) sugere a existência de circuitos seqüenciais não-acoplados, como mostrado na figura 2.7.



Figura 2.7 - Circuitos seqüenciais não-acoplados para o filtro de seqüência zero

Para o caso particular onde $L=L_M$, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}_h = j\omega h \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & L+M & 0 \\ 0 & 0 & L+M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}_h \quad (2.45)$$

A equação matricial (2.45) conduz a:

$$V_0 = 0 \quad (2.46)$$

$$\dot{V}_1 = j\omega h I_1 \cdot (L+M) \quad (2.47)$$

$$\dot{V}_2 = j\omega h I_2 \cdot (L+M) \quad (2.48)$$

A partir das equações (2.46-2.48), é possível obter as impedâncias seqüenciais, sob estas condições simplificadoras:

$$Z_0 = 0 \quad (2.49)$$

$$Z_1 = j\omega h \cdot (L+M) \quad (2.50)$$

$$Z_2 = j\omega h \cdot (L+M) \quad (2.51)$$

A partir das equações (2.49)-(2.51) é possível verificar a propriedade principal dos filtros de seqüência zero aqui focado, ou seja, $Z_0=0$.

Outro caminho para tal constatação é possível de obter a partir do equacionamento que se segue. Sabendo-se que $\dot{V}_{ABC} = T \cdot \dot{V}_{012}$, e combinando-se as equações (2.46)-(2.48) chega-se a:

$$\dot{V}_{A_n} = \frac{1}{3} j\omega h (L+M) \cdot (2\dot{I}_A - \dot{I}_B - \dot{I}_C) \quad (2.52)$$

$$\dot{V}_{B_n} = \frac{1}{3} j\omega h (L+M) \cdot (2\dot{I}_B - \dot{I}_C - \dot{I}_A) \quad (2.53)$$

$$\dot{V}_{C_n} = \frac{1}{3} j\omega h (L+M) \cdot (2\dot{I}_C - \dot{I}_A - \dot{I}_B) \quad (2.54)$$

Aplicando as expressões (2.52-2.54) acima para uma componente particular de seqüência zero, no caso $h=3$, obtém-se:

$$\dot{V}_{A_n(3)} = j\omega (L+M) \left(2I_3 \angle 0^\circ - I_3 \angle -360^\circ - I_3 \angle 360^\circ \right) \quad (2.55)$$

$$\dot{V}_{B_n(3)} = j\omega(L+M)\left(2I_3\angle-360^\circ - I_3\angle360^\circ - I_3\angle0^\circ\right) \quad (2.56)$$

$$\dot{V}_{C_n(3)} = j\omega(L+M)\left(2I_3\angle360^\circ - I_3\angle0^\circ - I_3\angle-360^\circ\right) \quad (2.57)$$

Novamente, as equações (2.55)-(2.57) evidenciam que as composições fasoriais das correntes harmônicas de ordem 3 resultam em tensões de terceiro harmônico nulas. Como apresentado nas equações (2.49)-(2.51), a interpretação física para o resultado anterior é que, para a frequência em questão, a impedância de seqüência zero é igual à zero. Se esta situação ideal ocorrer, toda a corrente harmônica de seqüência zero originada a partir de uma carga linear será desviada para o filtro em questão.

2.2.2 - FILTRO DE CORRENTES DE SEQÜÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA

O dispositivo eletromagnético utilizado como filtro harmônico de seqüência positiva e negativa fundamenta-se num reator a núcleo saturado trifásico. Este dispositivo, uma vez saturado, produz componentes harmônicas de correntes que serão utilizadas para o processo de compensação a ser discutido nesta seção. Este equipamento, construtivamente, tem seu núcleo trifásico como o de um transformador, sem, no entanto, possuir o enrolamento de potência no secundário. Outra diferença em relação aos transformadores está na definição de seu ponto de operação no que se refere à saturação. Nestes termos, reconhece-se que a não-linearidade da curva B x H do material magnético do reator se constitui em fator determinante para a sua operação. De fato, a isto se deve o expressivo conteúdo harmônico das suas correntes de alimentação e neste ponto concentra-se o princípio da compensação harmônica aqui focada.

Para viabilizar a citada compensação, de um modo ideal, a geração harmônica por parte do dispositivo sob análise deve apresentar a mesma magnitude, porém ângulos de fase opostos ao conteúdo harmônico produzido pela carga não-linear a ser compensada. A figura 2.8 ilustra a mencionada concepção física, evidenciando a carga geradora de harmônicos, o compensador ou filtro e a rede de suprimento.

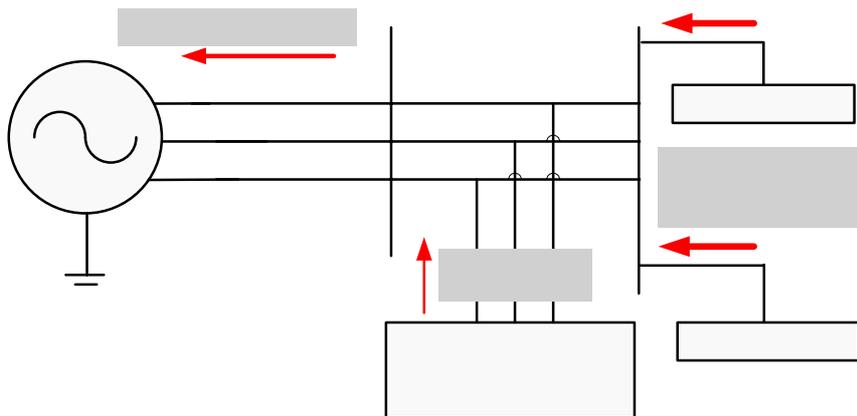


Figura 2.8 - Instalação típica do filtro eletromagnético de seqüência positiva e negativa

(a) Fundamentação operacional

3°, 9°, 11°, 13° harmônicos

Para fins do entendimento do princípio da compensação das correntes de seqüência positiva e negativa, a figura 2.9 sintetiza um arranjo equivalente que auxilia o entendimento do mecanismo aqui empregado. Este é constituído, basicamente, pela associação de uma carga não-linear, do dispositivo eletromagnético em questão e da rede de suprimento

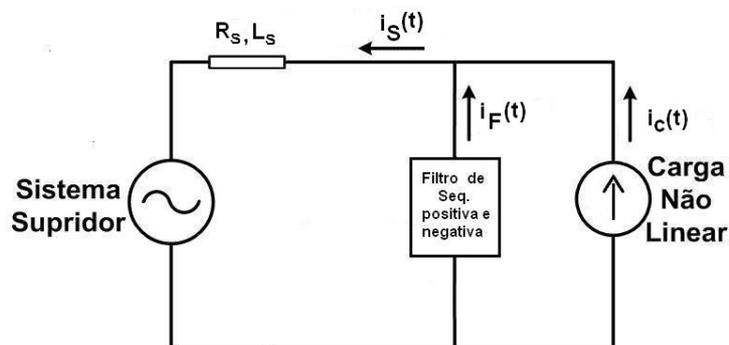


Figura 2.9 - Arranjo elétrico para a redução/cancelamento das correntes harmônicas de seqüência positiva e negativa

Onde:

- R_S, L_S - Impedância do sistema de suprimento;
- $i_S(t)$ - Corrente harmônica resultante injetada no sistema de suprimento;
- $i_F(t)$ - Corrente harmônica injetada pelo filtro de seqüência positiva e negativa;
- $i_C(t)$ - Corrente harmônica gerada pela carga não-linear.

As correntes harmônicas geradas pela carga não-linear e filtro podem ser escritas, genericamente, pelas equações (2.58) e (2.59).

$$i_C(t) = i_{C1}(t) + i_{C5}(t) + i_{C7}(t) + i_{C11}(t) + i_{C13}(t) + \dots \quad (2.58)$$

$$i_F(t) = i_{F1}(t) + i_{F5}(t) + i_{F7}(t) + i_{F11}(t) + i_{F13}(t) + \dots \quad (2.59)$$

Tomando por base que as componentes a serem compensadas sejam as harmônicas de quinta e sétima ordem, fato este que se baseia na busca da atenuação daquelas mais relevantes para a grande maioria dos sistemas, tem-se:

$$\dot{I}_{C5} = I_{C5} \angle \theta_{C5} \quad (2.60)$$

$$\dot{I}_{F5} = I_{F5} \angle \theta_{F5} \quad (2.61)$$

$$\dot{I}_{C7} = I_{C7} \angle \theta_{C7} \quad (2.62)$$

$$\dot{I}_{F7} = I_{F7} \angle \theta_{F7} \quad (2.63)$$

Em consonância com os princípios físicos estabelecidos para o processo de compensação, para proporcionar, idealmente, o cancelamento das componentes acima definidas, torna-se necessário o atendimento das seguintes condições:

$$|I_{C5}| = |I_{F5}| \quad (2.64)$$

$$\theta_{C5} = (\theta_{F5} \pm \pi) \quad (2.65)$$

$$|I_{C7}| = |I_{F7}| \quad (2.66)$$

$$\theta_{C7} = (\theta_{F7} \pm \pi) \quad (2.67)$$

As figuras 2.10 (a) e (b) ilustram tais situações:

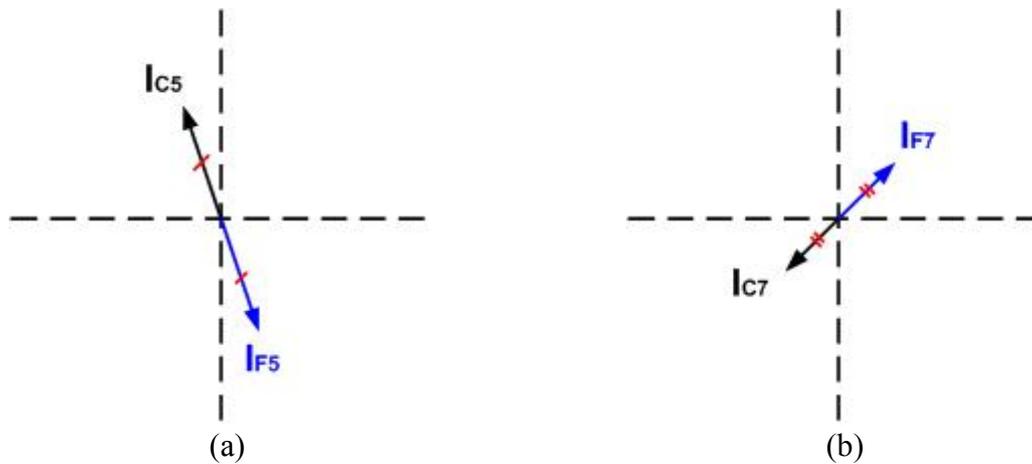


Figura 2.10 - Compensação harmônica das correntes de ordem 5 e 7 através do filtro de seqüência positiva e negativa

(b) Fundamentação matemática

Objetivando caracterizar o arranjo físico eletromagnético a ser empregado para os fins aqui delineados, o qual possui similaridade com aqueles empregados na tecnologia dos reatores a núcleo saturado para a compensação de reativos, a referência [52] apresenta o arranjo da figura 2.11 como ponto inicial para as discussões.

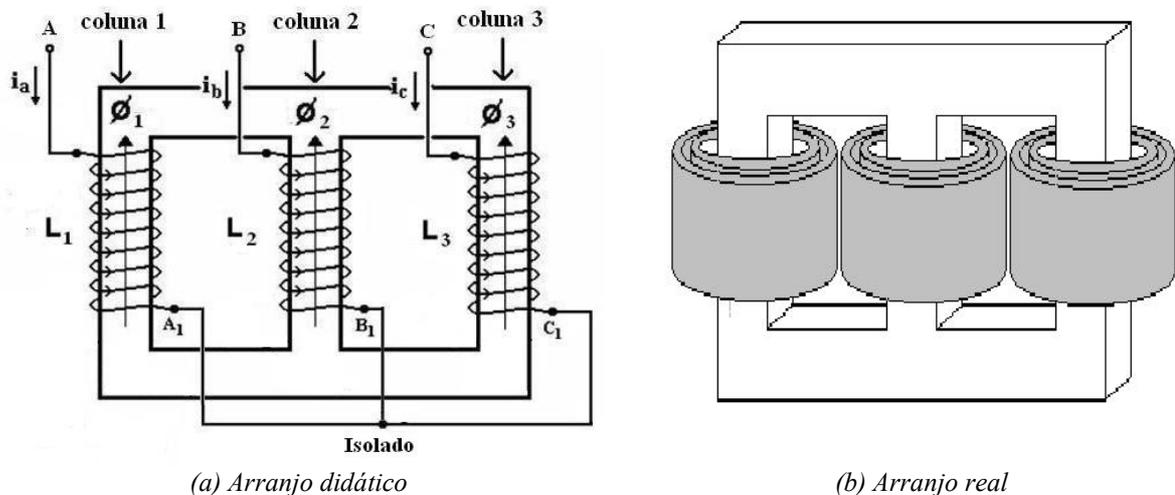


Figura 2.11 - Arranjo físico trifásico do filtro eletromagnético de seqüência positiva e negativa

Voltando agora o foco para a questão da modelagem matemática do dispositivo, objetivando, dentre outros aspectos, a obtenção da corrente de alimentação do reator e respectiva avaliação de seu conteúdo harmônico, ressalta-se que, diferentemente do produto anteriormente discutido, o reator saturado já possui uma base de modelagem bem estabelecida. Neste sentido destaca-se a referência [52], a qual se encontra inserida no contexto da tecnologia e ciência dos reatores saturados destinados ao controle de reativos em sistemas elétricos. As similaridades operacionais destes equipamentos com os aqui considerados são bastante grandes, principalmente no que se refere ao seu princípio funcional. Apesar disto, os dispositivos destinados à compensação de reativos se apresentam com substanciais complexidades construtivas por conta da compensação interna de harmônicos. Devido a esta identidade, acredita-se ser suficiente destacar neste trabalho apenas os pontos considerados fundamentais ao entendimento do processo e estabelecimento das equações básicas que regem o funcionamento do filtro aqui contemplado. De fato, os detalhes próprios a muitos dos desenvolvimentos matemáticos necessários à plena compreensão do assunto podem ser encontrados na já mencionada referência [52].

Iniciando pela consideração de um arranjo monofásico, no qual um reator se encontra suprido por uma fonte de tensão senoidal, tem-se a figura 2.12(a), que é indicativa do circuito elétrico equivalente a tal arranjo. Por outro lado, a figura 2.12(b) representa de modo bastante simplificado, a relação entre o fluxo e a corrente no reator. Finalmente, a figura 2.12(c) ilustra as correlações entre as grandezas elétricas e magnéticas envolvidas no processo. Mais uma vez, apoiando-se no fato de que o assunto já foi bastante explorado na literatura, consideram-se dispensáveis maiores discussões sobre o processo envolvido, a não ser pela identificação da corrente consumida pelo reator. Esta, como se vê, oferece as propriedades almejadas ao processo de compensação aqui discutido.

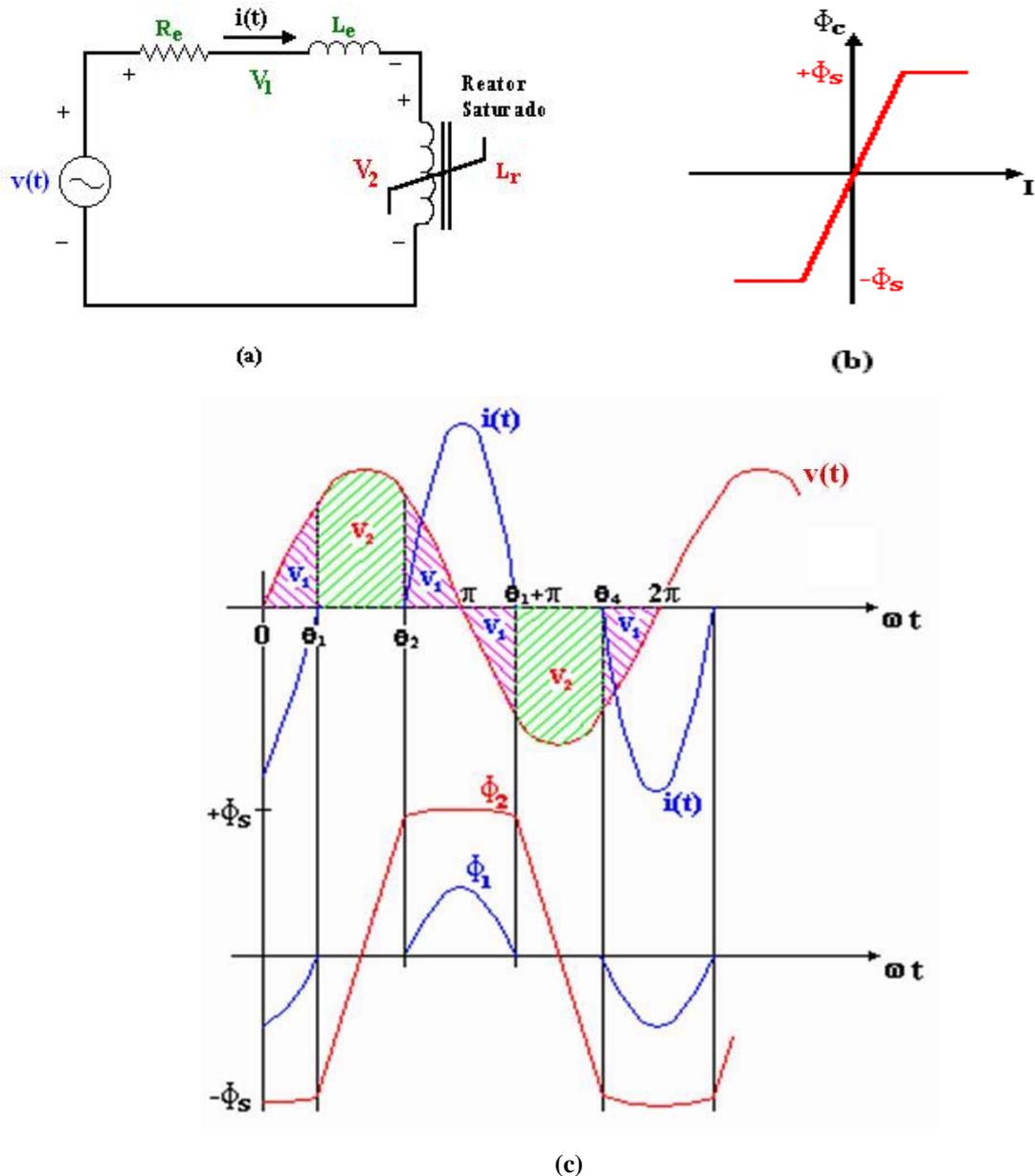


Figura 2.12 - Características de operação do reator saturado

(a) Circuito equivalente; (b) Relação fluxo versus corrente; (c) Formas de ondas da tensão, corrente e fluxo

Avançando agora na direção da topologia eletromagnética mais diretamente afeita ao filtro para compensação das componentes harmônicas de seqüência positiva e negativa, as figuras 2.13 (a) e (b) destacam duas possibilidades. Numa primeira, a conexão é em estrela aterrada, fato este que viabiliza a produção de componentes harmônicas de seqüência zero em

adição às demais. Na segunda, com a eliminação do aterramento do neutro, apenas as componentes de seqüência positiva e negativa passam a existir. Observa-se que as propostas ilustradas utilizam núcleos magnéticos trifásicos similares àqueles empregados para os filtros de seqüência zero. Mais uma vez, os princípios que regem o funcionamento destes núcleos trifásicos foram devidamente explorados na referência [52], razão pela qual o assunto da modelagem matemática e subseqüentes discussões são omitidos nesta etapa dos trabalhos.

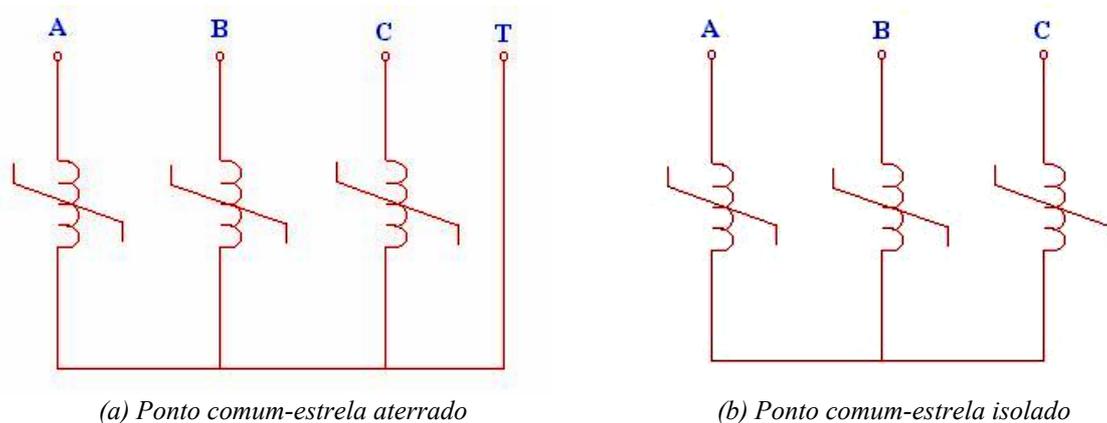


Figura 2.13 - Configurações para os reatores trifásicos

De modo a oferecer uma melhor compreensão para a base operacional do equipamento a ser utilizado nesta tese, apresenta-se, na seqüência, uma síntese do funcionamento da estrutura apresentada na figura 2.13(b). Para tanto, considera-se que o dispositivo seja dividido em três regiões distintas durante as quais, sempre, o nível de saturação existente em cada par de colunas magnéticas permite a manifestação de correntes. Neste sentido, cada intervalo de “condução” ocorre durante 60°, como pode ser visto na figura 2.14.

No intervalo (I), a coluna A não está saturada (NS), não existindo, portanto, qualquer corrente. Contudo, neste mesmo período existirá corrente através dos enrolamentos das colunas saturadas B e C (S). Durante o intervalo (II), as colunas A e B estão saturadas e experimentam corrente, enquanto que a coluna C não permite tal manifestação visto se encontrar na condição não-saturada. No intervalo (III), na coluna A permite a circulação de

corrente, porém em conjunto com a saturação junto à coluna C, agora saturada. Esta alternância provoca sucessivos pulsos de corrente.

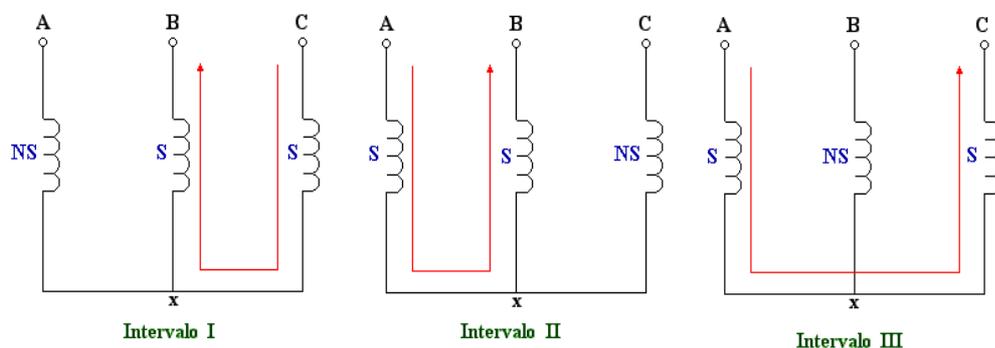


Figura 2.14 - Intervalos de manifestação de corrente devido à saturação magnética das colunas magnéticas - conexão estrela isolada

A figura 2.15 mostra as formas de onda da corrente e tensão em um ciclo da frequência de linha, conforme os intervalos de condução acima referidos.

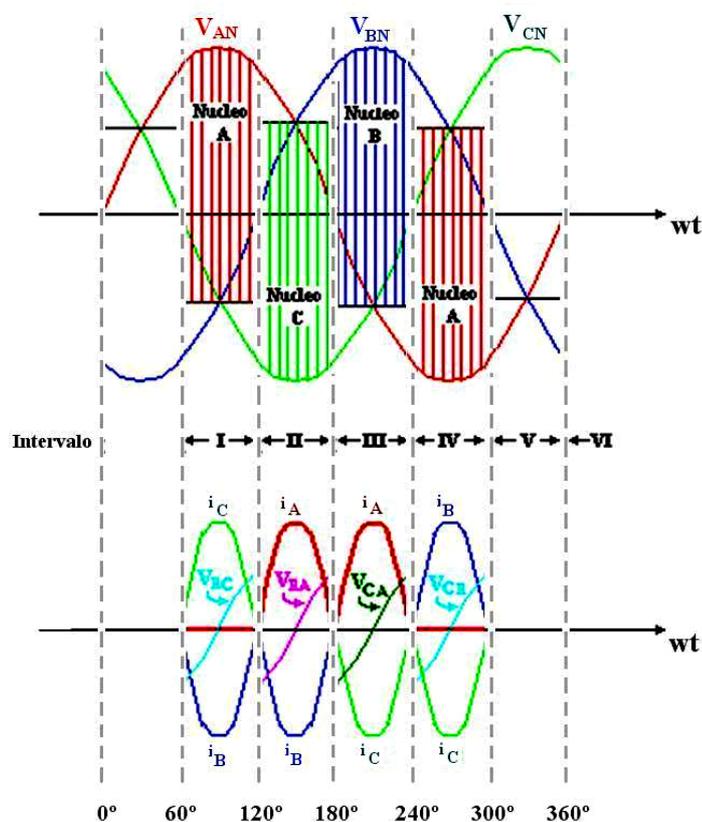


Figura 2.15 - Formas de onda das correntes e tensões do reator trifásico em estrela isolada

Muito embora o presente capítulo se encerre sem explorar os espectros harmônicos das correntes obtidas e ilustradas na figura 2.15, o que será oportunamente realizado, é conveniente, neste momento, destacar que o processo de compensação idealizado encontra-se alicerçado em dois pontos básicos:

- De forma a propiciar a defasagem necessária entre os harmônicos produzidos pelo reator saturado e aqueles gerados pelas cargas não-lineares, torna-se imperativo a incorporação de um mecanismo defasador que venha introduzir um deslocamento angular no fluxo concatenado e, por conseguinte, na corrente de alimentação do reator. Um ajuste adequado da defasagem pode, portanto, produzir o ângulo de fase oposto àquela harmônica que se deseja atenuar, como sugere o diagrama fasorial ilustrado na figura 2.16, o qual enfoca o deslocamento necessário para o cancelamento da quinta ordem harmônica;

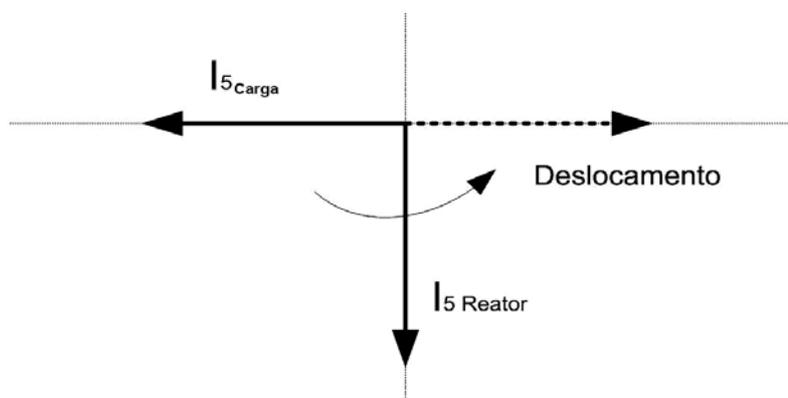


Figura 2.16 - Diagrama fasorial da compensação harmônica

- Com vistas a adequar os valores das correntes harmônicas ao processo de compensação, torna-se também essencial o ajuste do nível de saturação baseado nos parâmetros geométricos e na curva BxH. Neste contexto, é importante destacar que o ponto ótimo de operação será definido pela maior relação porcentual entre a componente harmônica que está sendo ajustada e a componente fundamental. Isto garantirá a melhor solução para o fator de deslocamento final do conjunto.

2.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo, centrado na concepção física dos produtos propostos nesta pesquisa, objetivou:

- Apresentar o princípio físico do funcionamento dos filtros eletromagnéticos de seqüência zero e seqüência positiva e negativa;
- Estabelecer as bases matemáticas que norteiam a operacionalidade dos filtros sob análise.

Uma vez alcançados os objetivos propostos, as principais contribuições oferecidas por este capítulo podem ser sintetizadas como a seguir:

- Fundamentação física sobre os princípios operacionais que norteiam o processo da compensação harmônica através de dispositivos eletromagnéticos;
- Propostas de concepções físicas construtivas dos dois tipos de filtros harmônicos eletromagnéticos;
- Fundamentação matemática para ambas as propostas de filtragem.

MODELAGEM DOS FILTROS ELETROMAGNÉTICOS

3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Seguindo a prática usual empregada nas mais diversas áreas de conhecimento, a obtenção de meios computacionais voltados para a avaliação de desempenho de dispositivos e sistemas, constitui-se, indubitavelmente, em mecanismos que permitem antever e corrigir situações passíveis de ocorrência quando da implementação prática de soluções e métodos.

Neste particular, face à inovação das propostas feitas nesta pesquisa e a inexistência de maiores experiências nacionais e internacionais sobre filtros eletromagnéticos, o desenvolvimento de modelos e respectivas implementações computacionais dos produtos aqui contemplados constitui-se em tema bastante original.

Para se atingir uma base computacional que permita avaliar o desempenho transitório e de regime permanente dos filtros, dentre os passos a serem seguidos, ressaltam-se:

- Identificação das partes físicas constituintes dos filtros;
- Suas modelagens matemáticas e, finalmente;
- Suas implementações em uma base computacional própria aos objetivos dos estudos.

Tendo em vista a natureza dos fenômenos focados nesta pesquisa, considera-se fundamental que os processos de simulação façam uso de técnicas de análise no domínio do tempo.

Dentro deste enfoque, este capítulo contempla os seguintes pontos básicos:

- Apresentar, de forma sucinta, as principais formas atualmente utilizadas para a modelagem de dispositivos eletromagnéticos utilizando, para tanto, técnicas no domínio do tempo;
- Destacar os recursos pré-existentes, destinados à modelagem de componentes elétricos e magnéticos, conforme requerido pelos equipamentos focados nesta pesquisa;
- Selecionar a estratégia de modelagem a ser empregada para os filtros eletromagnéticos;
- Estabelecer os modelos em consonância com a base computacional escolhida;
- Promover estudos avaliativos sobre a eficácia e a qualidade da modelagem, para fins da reprodução de fenômenos em regime permanente relacionados com a operação dos filtros eletromagnéticos.

3.2 - ESTRATÉGIAS DE SIMULAÇÃO

Durante as últimas décadas, diversas abordagens têm sido usadas para a modelagem de transformadores, reatores e outros dispositivos eletromagnéticos [46, 52, 53]. Essas podem ser classificadas em estratégias fundamentadas em [55]:

- Equações elétricas;
- Equações elétricas e magnéticas;

- Relutâncias magnéticas e forças magnetomotrizes.

A seguir, procede-se a uma breve discussão sobre os princípios que norteiam as metodologias mencionadas acima.

3.2.1 - EQUAÇÕES ELÉTRICAS

O circuito elétrico equivalente fundamenta-se, como é classicamente conhecido, nos seguintes elementos: indutâncias não-lineares para representar os circuitos magnéticos saturáveis; indutâncias lineares representando os fluxos de dispersão e resistências para a inclusão das perdas no cobre. Desta forma, os fenômenos magnéticos são traduzidos em componentes elétricos e as tradicionais equações de equilíbrio entre as tensões constituem a base da modelagem.

3.2.2 - EQUAÇÕES ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS

Neste particular, a sistemática consiste na representação do equipamento ou do sistema através de equações diferenciais e algébricas. O procedimento faz uso da analogia clássica entre circuitos elétricos e circuitos magnéticos, o que permite derivar as equações nodais que relacionam as forças magnetomotrizes nodais no núcleo dos filtros às forças magnetomotrizes produzidas pelos enrolamentos. Esta estratégia origina uma matriz de relutâncias (ou de permeâncias) relacionando as grandezas: fluxo e força magnetomotriz.

A utilização dessa abordagem para a modelagem de dispositivos eletromagnéticos determina a necessidade de se obter equações diferenciais e algébricas envolvendo os enrolamentos e os fluxos magnéticos que os acoplam e, qualquer alteração na conexão dos enrolamentos requer que as equações sejam reescritas. Sem dúvida, haverá grande demanda

de tempo e esforço de programação, contrariando a tendência crescente do uso de uma plataforma computacional voltada especificamente para a simulação de sistemas elétricos, na qual os usuários atêm-se na observação dos fenômenos e na análise dos resultados.

3.2.3 - USO DE RELUTÂNCIAS E FORÇAS MAGNETOMOTRIZES

A modelagem do dispositivo, nos termos aqui mencionados, baseia-se na representação do mesmo através de seus circuitos magnéticos equivalentes, nos quais as relutâncias representam os caminhos do fluxo magnético e os enrolamentos representam as forças magnetomotrizes. Assim, quando uma tensão é aplicada numa bobina enrolada sobre um núcleo magnético, tal que por ela circule uma corrente elétrica, uma força magnetomotriz é gerada no núcleo magnético. Por outro lado, a variação do fluxo magnético em um núcleo pode gerar uma força eletromotriz numa bobina enrolada sobre este núcleo.

O simulador computacional utilizado possui uma variedade de blocos de dispositivos (modelos representados por *templates*) incorporados e disponibilizados em sua biblioteca, capazes de simular os fenômenos elétricos e magnéticos concomitantemente.

Esta última opção foi a adotada para fins deste trabalho, a qual recaiu sobre um simulador computacional que utiliza técnicas de modelagem no domínio do tempo. Isto permitirá estudos avaliativos dos produtos contemplados nesta tese, tanto em regime permanente como também sob condições transitórias.

3.3 - TÉCNICA DE MODELAGEM SELECIONADA

O primeiro passo para a realização de um estudo computacional no simulador utilizado consiste na criação de uma *netlist*, a qual corresponde a uma lista de chamadas de modelos

elétricos e magnéticos, especificando os modelos (*templates*) a serem usados no sistema ora simulado e como eles estão conectados entre si. Esta etapa define um arquivo texto de entrada para o simulador.

Quando o sistema elétrico a ser simulado contém um enrolamento de um transformador, na *netlist* aparecerá, necessariamente, em uma das linhas, uma referência ao *template wind.sin*, o qual é esquematicamente ilustrado na figura 3.1.

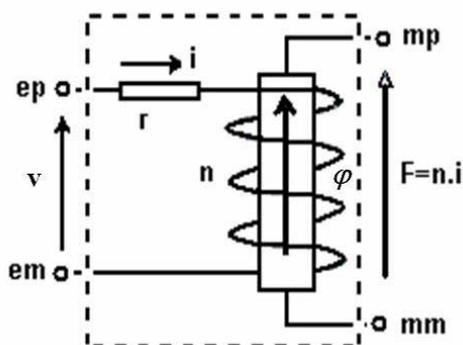


Figura 3.1 - Diagrama esquemático equivalente do template wind.sin

Os parâmetros principais do *template wind.sin*, destacados na figura anterior, são:

- ep, em - Terminais elétricos (positivo e negativo);
- mp, mm - Terminais magnéticos (positivo e negativo);
- n - Número de espiras da bobina;
- r - Resistência elétrica da bobina [Ω].

As equações (3.5) e (3.6) descrevem o *template wind.sin*:

$$v = r.i + n \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.5)$$

$$F = n.i \quad (3.6)$$

Sendo:

- F - Força magnetomotriz [A-espira];
- φ - Fluxo magnético [Wb];
- i - Corrente elétrica [A];

v - Tensão aplicada [V].

A corrente elétrica (i) circulando no enrolamento da bobina produz uma força magnetomotriz (F) entre os terminais magnéticos do enrolamento, os quais podem ser ligados aos terminais magnéticos do núcleo. A força magnetomotriz produzida na bobina é aplicada ao núcleo, produzindo um fluxo magnético (ϕ), cuja intensidade e natureza dependerão das características magnéticas do material e da geometria do núcleo, isto é, da relutância magnética do núcleo (R). A relação entre F e R é dada pela expressão (3.7):

$$F = R \cdot \phi \quad (3.7)$$

Caso a relutância do núcleo seja linear, ela será representada pelo *template core.sin*. Os principais parâmetros requeridos pelo referido *template* são: área da secção transversal, comprimento e permeabilidade do material do núcleo, como mostrado na figura 3.2.

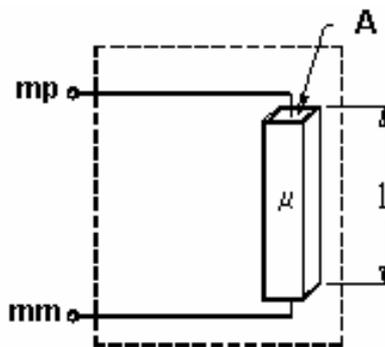


Figura 3.2 - Diagrama esquemático equivalente do *template core.sin*

Sendo:

l - Comprimento médio do núcleo magnético [m];

A - Área transversal do núcleo magnético [m²].

A relutância magnética, de um modo geral, pode ser expressa pela equação (3.8):

$$R = \frac{l}{\mu \cdot A} = \frac{l}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A} \quad (3.8)$$

No simulador utilizado, a relutância não-linear de um núcleo de material ferromagnético é representada pelo *template corenl.sin*. Este *template* se comporta segundo a igualdade $\mu = dB/dH$. Como acontece para o núcleo linear, este possui duas conexões (p, m), declaradas como pinos magnéticos. Além do comprimento e da área do núcleo, outros parâmetros são requeridos pelo *template corenl.sin*: Estes são:

- matl - material do núcleo. Para cada material na biblioteca do programa existe um dado que caracteriza a curva B-H do material;
- sf - fator de empilhamento;
- u_i - permeabilidade inicial;
- u_{hc} - permeabilidade coerciva;
- b_{max} - maior valor de B disponível para o material;
- h_{max} - maior valor de H disponível para o material;
- b_{sat} - valor de B na curva B-H que corresponde ao H de saturação;
- h_{sat} - ponto na curva B-H em que as curvas inferior e superior se encontram e se tornam quase que indistinguíveis;
- br - valor de B quando h retorna a zero. Este é o ponto no qual a curva superior B-H corta o eixo y;
- h_c - força coerciva, valor de H necessário para mover B=B_{res} para B=0. É o ponto no qual a curva superior B-H passa pelo eixo x;
- p_{temp} - especifica a temperatura em que todos os parâmetros acima estão definidos;
- tau - especifica o tempo de atraso entre o campo aplicado e o campo efetivo;
- b₀ - valor do B inicial de *offset*;
- tempc - especifica a temperatura de operação do *template corenl*;
- units - seleciona o sistema de unidades (Gaussiano ou SI).

Os modelos completos dos filtros eletromagnéticos, objetos dos estudos, podem ser estabelecidos pelas combinações adequadas dos três tipos básicos de *templates* (*wind.sin*, *core.sin* e *corenl.sin*). Assim agindo, torna-se possível a obtenção dos *templates* específicos

destinados à representação de vários tipos de filtros, dentre eles os aqui enfocados. Para tanto, basta contemplar as diferentes ligações dos enrolamentos e configurações dos núcleos magnéticos. A facilidade de se conectar os *templates* torna a implementação de modelos de filtros eletromagnéticos uma tarefa relativamente simples e direta.

3.4 - MODELAGEM DO FILTRO DE SEQUÊNCIA ZERO

Reportando ao arranjo físico do filtro de seqüência zero, pode-se derivar o circuito magnético equivalente formado pela combinação das relutâncias e forças magnetomotrizes. O resultado deste procedimento encontra-se mostrado na figura 3.3. É possível observar, nesta figura, a substituição dos enrolamentos por fontes de forças magnetomotrizes e as seções magnéticas por relutâncias. Ainda, objetivando uma modelagem mais exata, é possível identificar a inserção de caminhos magnéticos através do ar, os quais são indicativos das indutâncias de dispersão. As relutâncias em negrito estão associadas com as partes magnéticas sujeitas à saturação, enquanto que as demais são representativas das partes não-saturáveis (ar).

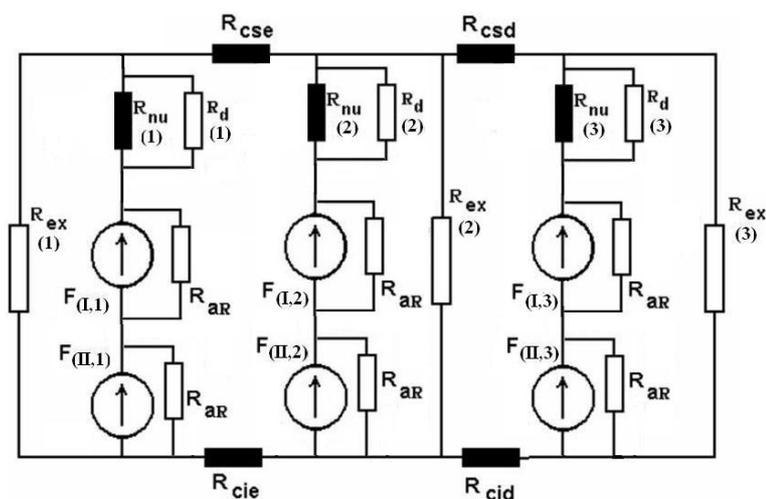


Figura 3.3 - Modelo magnético equivalente do filtro de seqüência zero

Na figura 3.3:

- $F_{(I,i)}$; $F_{(II,i)}$ - Força magnetomotriz do enrolamento I e II, respectivamente, para cada coluna i ;
- $R_{nu(i)}$, R_{cse} , R_{csd} , R_{cie} e R_{cid} - Relutâncias não-lineares correspondentes ao núcleo ferromagnético e culatras;
- $R_{ex(i)}$ - Relutâncias lineares representando o fluxo de dispersão entre as culatras superior e inferior, para cada coluna;
- $R_{d(i)}$ - Relutâncias lineares representando o fluxo de dispersão equivalente entre as bobinas e o núcleo, para cada coluna;
- R_{ar} - Relutâncias lineares representando o fluxo de dispersão entre as bobinas e o ar, para cada coluna.

A figura 3.4, por sua vez, mostra o modelo eletromagnético obtido em consonância com os recursos disponibilizados pelo simulador utilizado.

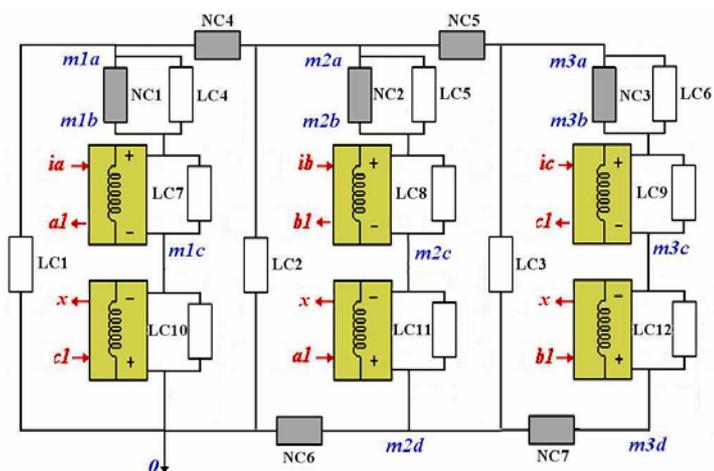


Figura 3.4 - Modelo eletromagnético equivalente do filtro de seqüência zero para o simulador utilizado

Na figura 3.4:

- NC1 até NC7 - Núcleos magnéticos não-lineares, utilizando o *template corenl.sin*;
- $m1a$, $m1b$, $m1c$, $m2a$, $m2b$, $m2c$, $m2d$, $m3a$, $m3b$, $m3c$ e $m3d$ - São pontos de conexão das partes do núcleo que representam todo o espaço do núcleo, com enrolamento e sem enrolamento;

- ia e $a1$, ib e $b1$, ic e $c1$ - São pinos elétricos que representam a alimentação das bobinas do filtro de seqüência zero, sendo ia , ib e ic utilizando o *template* fonte.*sin* e os demais são interligações entre bobinas.
- LC1 até LC12 - Núcleos magnéticos lineares que representam os fluxos de dispersão através do ar.

Na figura 3.4 constata-se ainda que os terminais dos enrolamentos (*templates wind*) ficam acessíveis para os arranjos elétricos em zigue-zague exigidos na montagem do filtro eletromagnético.

Para a representação da não-linearidade, como já mencionado, far-se-á uso do *template corenl*, representando, assim, com fidelidade, o comportamento do núcleo não-linear. Os dados necessários para essa modelagem são: μ_i , μ_{hc} , b_{max} , h_{max} , b_{sat} , h_{sat} , b_r e h_c , além da escolha do tipo de material que compõe o núcleo. Estes dados foram colhidos a partir de ensaios no filtro eletromagnético de seqüência zero, conforme apresentado na referência [46].

Finalmente, apresenta-se, a seguir, o *template* destinado à modelagem de um filtro eletromagnético de seqüência zero.

```
##### FILTRO ELETROMAGNÉTICO DE SEQUENCIA ZERO #####
# enrolamentos-----
# fase A
wind.I1 ia a1 m1b m1c=n=133, r=0.36
wind.II1 x c1 m1c 0 =n=133, r=0.36

core.LC7 m1b m1c=area=11.1143e-4, len=0.121, ur=1, geo_units=meter
core.LC10 m1c 0 =area=11.1143e-4, len=0.121, ur=1, geo_units=meter

# fase B
wind.I2 ib b1 m2b m2c=n=133, r=0.36
wind.II2 x a1 m2c m2d=n=133, r=0.36

core.LC8 m2b m2c=area=11.1143e-4, len=0.121, ur=1, geo_units=meter
core.LC11 m2c m2d=area=11.1143e-4, len=0.121, ur=1, geo_units=meter

# fase C
```

```
wind.I3 ic c1 m3b m3c=n=133, r=0.36
wind.II3 x b1 m3c m3d=n=133, r=0.36

core.LC9 m3b m3c=area=11.1143e-4, len=0.121, ur=1, geo_units=meter
core.LC12 m3c m3d=area=11.1143e-4, len=0.121, ur=1, geo_units=meter

# núcleos -----

# núcleo 1
corenl.NC1 m1a m1b = len=0.181, area=26.49e-04, model=
[(ui=1800,uhc=15120,bmax=16412,hmax=5.31,bsat=13528,hsat=3.14,br=900,
hc=0.44,ptemp=20,tau=0)], tempc=20,units=gauss

core.LC4 m1a m1b=area=11.1143e-4, len=0.121, ur=1,geo_units=meter
core.LC1 m1a 0=area=11.1143e-4, len=0.241, ur=1,geo_units=meter

# núcleo 2
corenl.NC2 m2a m2b = len=0.181, area=26.49e-04, model=
[(ui=1800,uhc=15120,bmax=16412,hmax=5.31,bsat=13528,hsat=3.14,br=900,
hc=0.44,ptemp=20,tau=0)], tempc=20,units=gauss

core.LC5 m2a m2b=area=11.1143e-4, len=0.121, ur=1,geo_units=meter
core.LC2 m2a 0=area=11.1143e-4, len=0.241, ur=1,geo_units=meter

# núcleo 3
corenl.NC3 m3a m3b = len=0.181, area=26.49e-04, model=
[(ui=1800,uhc=15120,bmax=16412,hmax=5.31,bsat=13528,hsat=3.14,br=900,
hc=0.44,ptemp=20,tau=0)], tempc=20,units=gauss

core.LC6 m3a m3b=area=11.1143e-4, len=0.121, ur=1,geo_units=meter
core.LC3 m3a m2d=area=11.1143e-4, len=0.241, ur=1,geo_units=meter

# culatras superiores
corenl.NC4 m1a m2a = len=0.032, area=26.49e-04, model=
[(ui=1800,uhc=15120,bmax=16412,hmax=5.31,bsat=13528,hsat=3.14,br=900,
hc=0.44,ptemp=20,tau=0)], tempc=20,units=gauss

corenl.NC5 m2a m3a = len=0.032, area=26.49e-04, model=
[(ui=1800,uhc=15120,bmax=16412,hmax=5.31,bsat=13528,hsat=3.14,br=900,
hc=0.44,ptemp=20,tau=0)], tempc=20,units=gauss

# culatras inferiores
corenl.NC6 0 m2d = len=0.032, area=26.49e-04, model=
[(ui=1800,uhc=15120,bmax=16412,hmax=5.31,bsat=13528,hsat=3.14,br=900,
hc=0.44,ptemp=20,tau=0)], tempc=20,units=gauss

corenl.NC7 m2d m3d = len=0.032, area=26.49e-04, model=
[(ui=2500,uhc=15120,bmax=16412,hmax=5.31,bsat=13528,hsat=3.14,br=900,
hc=0.44,ptemp=20,tau=0)], tempc=20,units=gauss

# relutância de seqüência zero
core.sz zero m2a 0=area=18.423e-4, len=0.288, ur=1, geo_units=meter

# Fim do template
```

De modo a oferecer uma visão construtiva mais simplificada, a figura 3.5 indica a estrutura física para o filtro de seqüência zero empregado nos estudos.

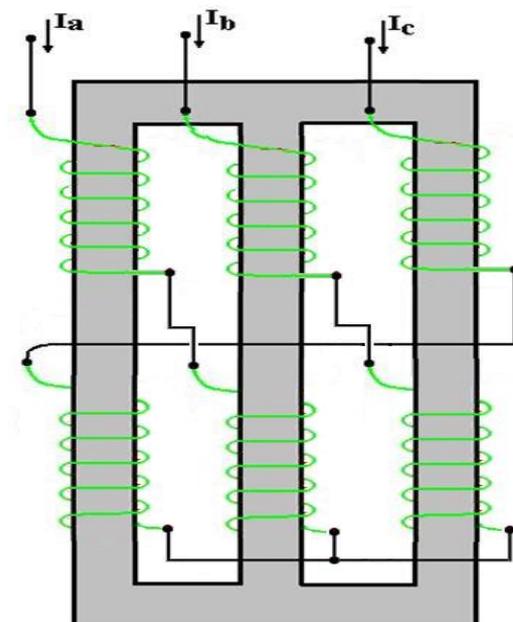


Figura 3.5 - Modelo físico do filtro de seqüência zero implementado computacionalmente

Como forma de verificar o caminho de baixa impedância criado pelo filtro eletromagnético para as correntes de seqüência zero, apresenta-se, a seguir, resultados de simulação utilizando o *template* mostrado anteriormente. Para tanto, aplicou-se um conjunto trifásico de tensões de alimentação contendo 127 V (fase-neutro) RMS, sobre a qual se encontra superposta uma tensão de seqüência zero de 10% (12,7 V), na freqüência de 180 Hz. Assim procedendo, torna-se viável a visualização do desempenho teórico do filtro no que tange à absorção das componentes de seqüência zero. A figura 3.6 ilustra o diagrama fasorial utilizado para este estudo. O funcionamento do filtro pode ser apreciado pela observação das figuras 3.7 e 3.8. Primeiramente, são apresentadas as tensões fase-neutro aplicadas ao filtro, com o espectro harmônico da tensão na fase A. Na seqüência as formas de onda das correntes de linha que se estabelecem pelo filtro, seguidas dos respectivos espectros harmônicos.

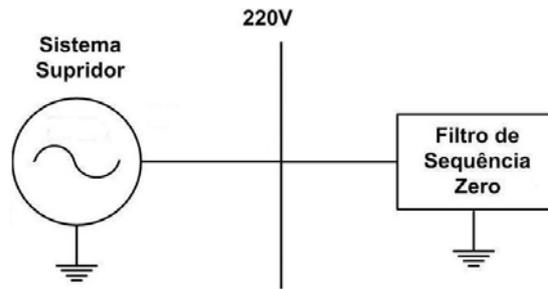


Figura 3.6 - Diagrama unifilar utilizado para a visualização da eficácia do filtro de seqüência zero

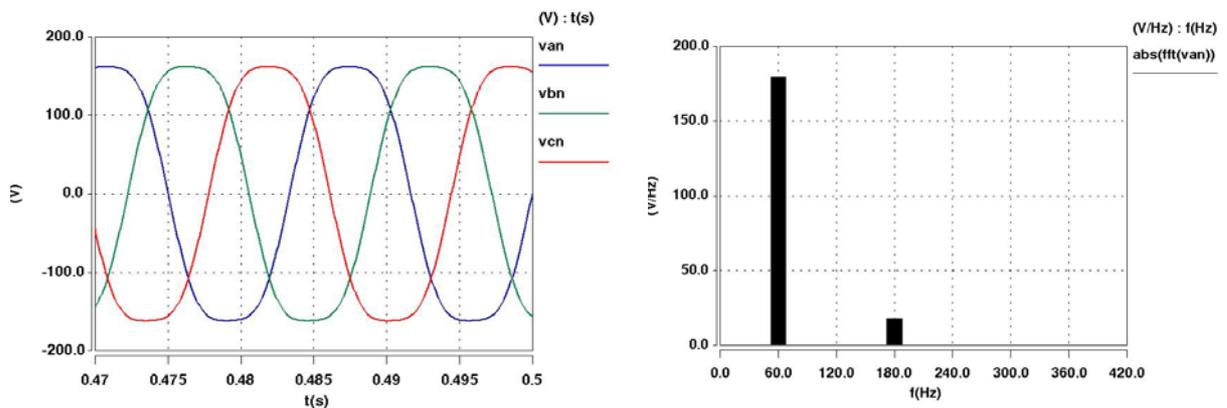
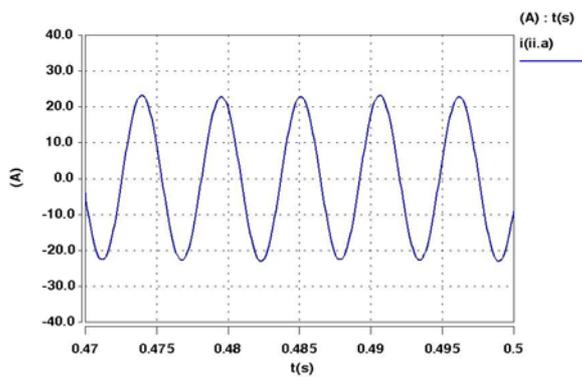
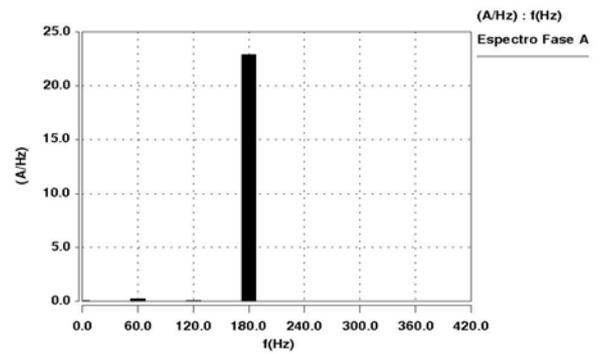


Figura 3.7 - Formas de onda das tensões distorcidas aplicadas no filtro de seqüência zero e espectro harmônico da tensão Van

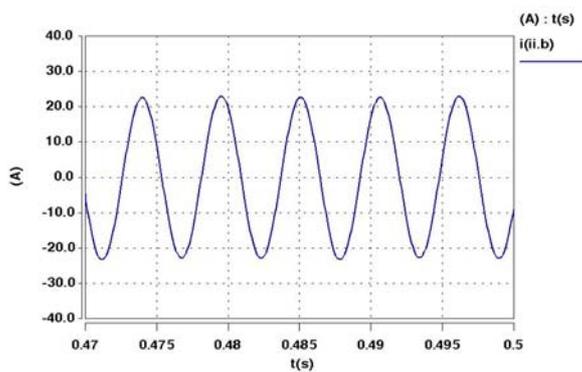
Como pode ser verificado através dos resultados computacionais, sob a ação de um suprimento contendo uma tensão fundamental de seqüência positiva e outra de terceira harmônica de seqüência zero, a corrente no filtro encontra-se predominantemente caracterizada por uma corrente de ordem 3 e de amplitude da ordem de 22 A. Isto ratifica as expectativas feitas até então e evidencia a eficácia do dispositivo em absorver a seqüência zero através de uma baixa impedância a esta seqüência e, por outro lado, uma alta impedância à seqüência positiva.



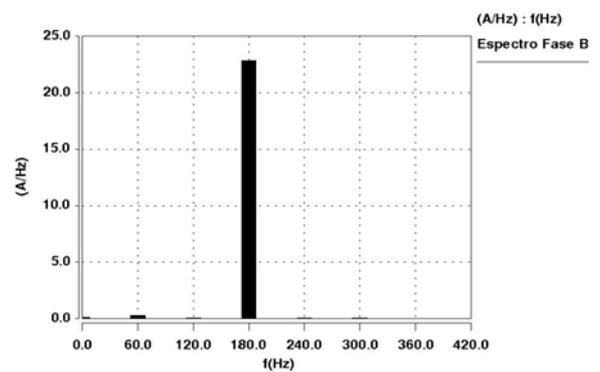
Forma de onda da corrente da linha A



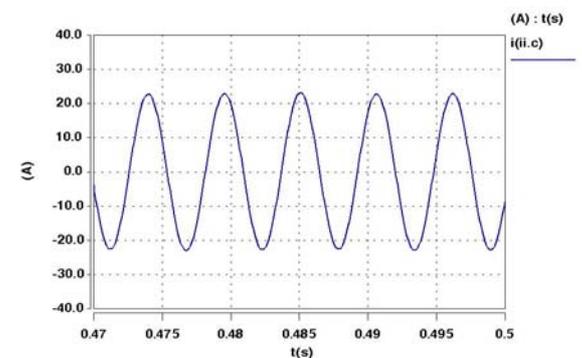
Espectro harmônico da corrente na linha A



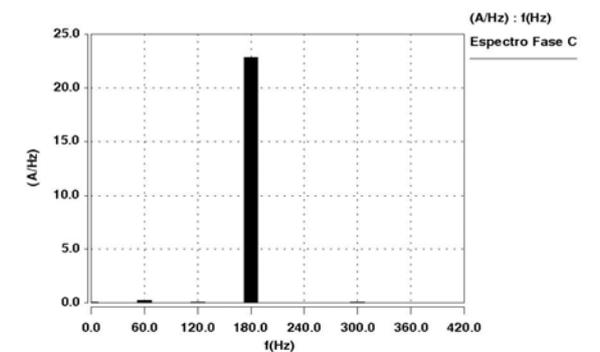
Forma de onda da corrente da linha B



Espectro harmônico da corrente na linha B



Forma de onda da corrente da linha C



Espectro harmônico da corrente na linha C

Figura 3.8 - Formas de ondas e respectivos espectros harmônicos das correntes de linha do filtro harmônico de seqüência zero

Não obstante o desempenho satisfatório obtido, é importante ressaltar que outras investigações serão conduzidas oportunamente para uma melhor certificação de suas propriedades.

3.5 - MODELAGEM DO FILTRO DE SEQUÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA

Voltando agora as atenções para o arranjo físico do filtro de seqüência positiva e negativa, pode-se, de modo similar aos procedimentos anteriores, derivar o circuito magnético equivalente formado pela combinação das relutâncias e forças magnetomotrizes. O circuito equivalente indicado na figura 3.9 evidencia a já mencionada similaridade entre os processos.

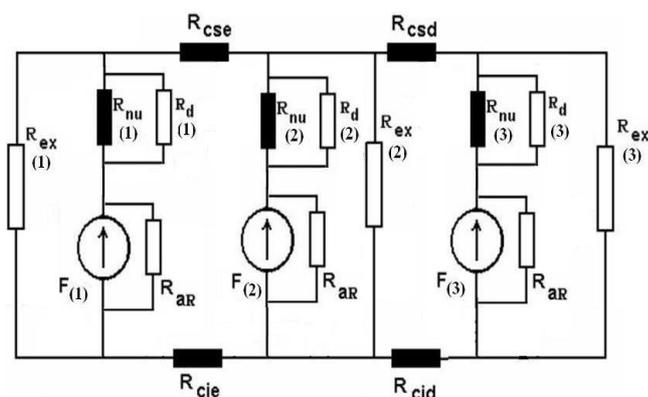


Figura 3.9 - Modelo magnético equivalente do filtro de seqüência positiva e negativa

Tendo em vista que os elementos componentes do circuito equivalente são semelhantes àqueles já comentados para o filtro de seqüência zero, torna-se dispensável, neste momento, repetir o significado dos mesmos. A distinção maior se faz na forma da existência, para os novos filtros, de apenas uma única fonte de força magnetomotriz por coluna magnética. Estas são:

$F_{(1)}, F_{(2)}, F_{(3)}$ - Força magnetomotriz no enrolamento para cada coluna.

A figura 3.10, também similar ao caso anterior, ilustra o modelo eletromagnético em consonância com os recursos disponibilizados pelo simulador utilizado.

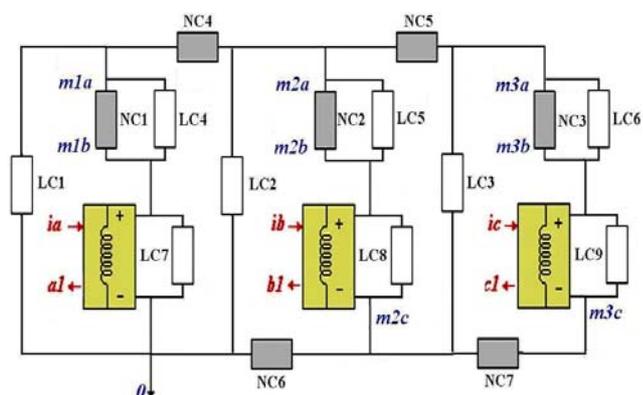


Figura 3.10 - Diagramas de blocos do filtro harmônico de seqüência positiva e negativa implementado computacionalmente

Na figura 3.10:

- NC1 até NC7 - Núcleos magnéticos não-lineares, utilizando o *template corenl.sin*;
- $m1a$, $m1b$, $m2a$, $m2b$, $m2c$, $m3a$, $m3b$ e $m3c$ - São pontos de conexão das partes do núcleo que representam o espaço do núcleo com enrolamento e sem enrolamento;
- ia e $a1$, ib e $b1$, ic e $c1$ - São pinos elétricos que representam a alimentação das bobinas do filtro harmônico em questão, sendo ia , ib e ic utilizando o *template fonte.sin* e os demais são interligações entre bobinas;
- LC1 até LC9 - Núcleos magnéticos lineares que representam os fluxos de dispersão através do ar.

Da mesma forma que para o filtro de seqüência zero, a representação da não-linearidade é realizada através do *template corenl*.

A partir do exposto, é possível a elaboração do *template* destinado à modelagem de um filtro eletromagnético de seqüência positiva e negativa. O resultado desta etapa é mostrado a seguir.

```
#####      FILTRO ELETROMAGNÉTICO DE SEQUENCIA POSITIVA E NEGATIVA      #####

# enrolamentos-----

# fase A
wind.I1 ia a1 m1b 0 =n=116, r=0.14112
core.LC7 m1b 0=area=1.9e-4, len=0.121, ur=1, geo_units=meter

# fase B
wind.I2 ib b1 m2b m2c =n=116, r=0.14112
core.LC8 m2b m2c=area=1.9e-4, len=0.121, ur=1, geo_units=meter

# fase C
wind.I3 ic c1 m3b m3c =n=116, r=0.14112
core.LC9 m3b m3c=area=1.9e-4, len=0.121, ur=1, geo_units=meter

# núcleos -----

# núcleo 1
corenl.NC1 m1a m1b = len=0.195, area=19.488e-04, model=
[(ui=2500,uhc=60000,bmax=18000,hmax=21.36,bsat=17000,hsat=12.56,br=850,
hc=1,ptemp=20,tau=0)], tempc=20,units=gauss
core.LC4 m1a m1b=area=1.9e-4, len=0.121, ur=1,geo_units=meter
core.LC1 m1a 0=area=1.9e-4, len=0.241, ur=1,geo_units=meter

# núcleo 2
corenl.NC2 m2a m2b = len=0.195, area=19.488e-04, model=
[(ui=2500,uhc=60000,bmax=18000,hmax=21.36,bsat=17000,hsat=12.56,br=850,
hc=1,ptemp=20,tau=0)], tempc=20,units=gauss
core.LC5 m2a m2b=area=1.9e-4, len=0.121, ur=1,geo_units=meter
core.LC2 m2a 0=area=1.9e-4, len=0.241, ur=1,geo_units=meter

# núcleo 3
corenl.NC3 m3a m3b = len=0.195, area=19.488e-04, model=
[(ui=2500,uhc=60000,bmax=18000,hmax=21.36,bsat=17000,hsat=12.56,br=850,
hc=1,ptemp=20,tau=0)], tempc=20,units=gauss
core.LC6 m3a m3b=area=1.9e-4, len=0.121, ur=1,geo_units=meter
core.LC3 m3a m2c=area=1.9e-4, len=0.241, ur=1,geo_units=meter

# culatras superiores
corenl.NC4 m1a m2a = len=0.08, area=19.488e-04, model=
[(ui=2500,uhc=60000,bmax=18000,hmax=21.36,bsat=17000,hsat=12.56,br=850,
hc=1,ptemp=20,tau=0)], tempc=20,units=gauss

corenl.NC5 m2a m3a = len=0.08, area=19.488e-04, model=
[(ui=2500,uhc=60000,bmax=18000,hmax=21.36,bsat=17000,hsat=12.56,br=850,
hc=1,ptemp=20,tau=0)], tempc=20,units=gauss

# culatras inferiores
corenl.NC6 0 m2c = len=0.08, area=19.488e-04, model=
[(ui=2500,uhc=60000,bmax=18000,hmax=21.36,bsat=17000,hsat=12.56,br=850,
hc=1,ptemp=20,tau=0)], tempc=20,units=gauss

corenl.NC7 m2c m3c = len=0.08, area=19.488e-04, model=
[(ui=2500,uhc=60000,bmax=18000,hmax=21.36,bsat=17000,hsat=12.56,br=850,
hc=1,ptemp=20,tau=0)], tempc=20,units=gauss

# Fim do template
```

A figura 3.11 indica a estrutura física para o filtro de seqüência positiva e negativa empregado nos estudos. Objetivando uma avaliação preliminar do desempenho da modelagem estabelecida, tal como realizado anteriormente com o filtro de seqüência zero, realiza-se, a seguir, um estudo voltado para a identificação da eficácia do dispositivo.

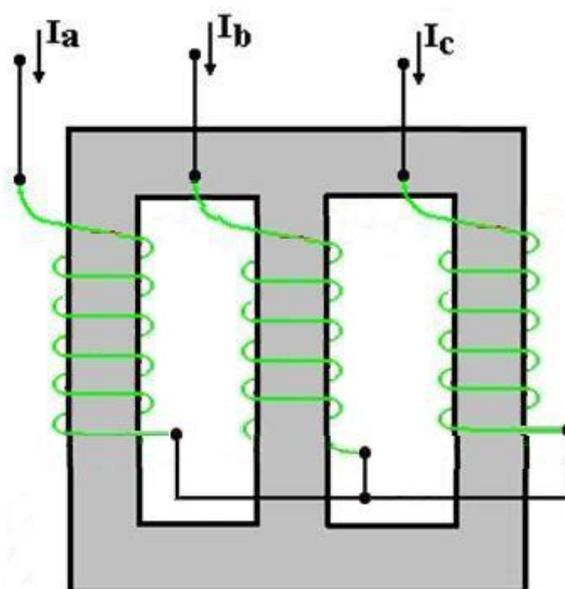


Figura 3.11 - Modelo físico do filtro harmônico de seqüência positiva e negativa implementado computacionalmente

Para tanto, procede-se a uma simulação que consiste, basicamente, da aplicação de uma tensão fase-neutro de 120 V - RMS, objetivando, assim, conduzir o reator a um estado apropriado de saturação. A figura 3.12 ilustra o arranjo utilizado.

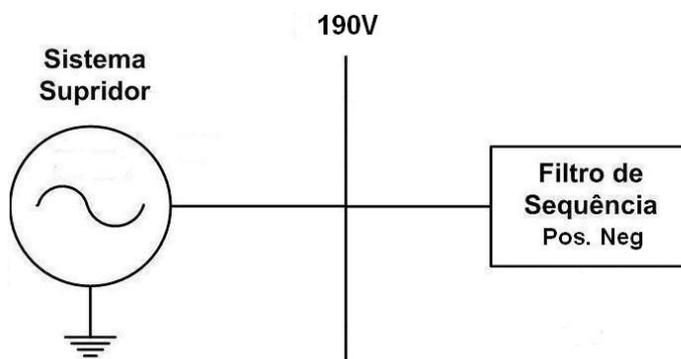


Figura 3.12 - Diagrama unifilar utilizado para a verificação preliminar da eficácia do filtro de seqüência positiva e negativa

A figura 3.13 apresenta as formas de onda das tensões fase-neutro, enquanto que as figuras 3.14 (a) e (b) ilustram as correntes e correspondentes espectros harmônicos na entrada do filtro sob enfoque.

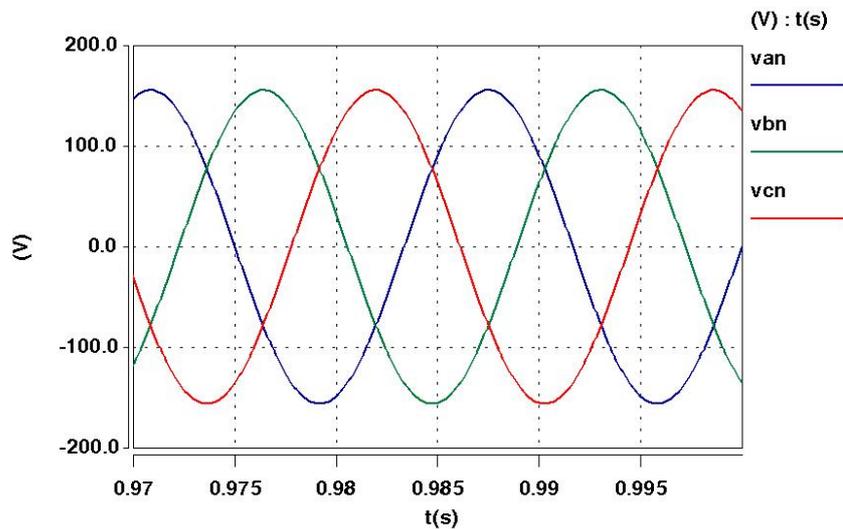
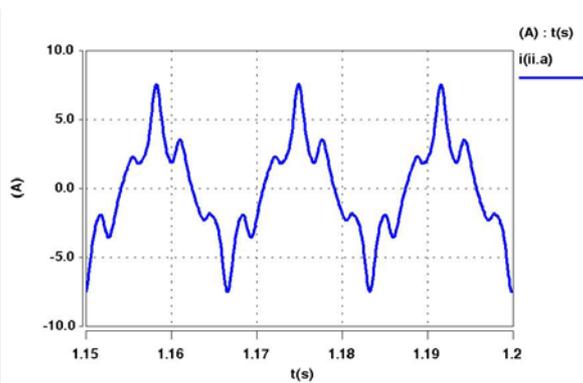
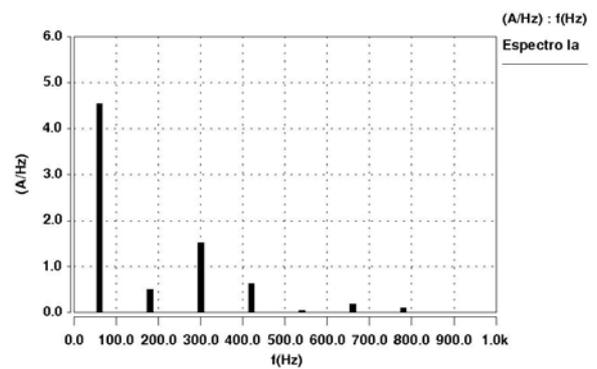


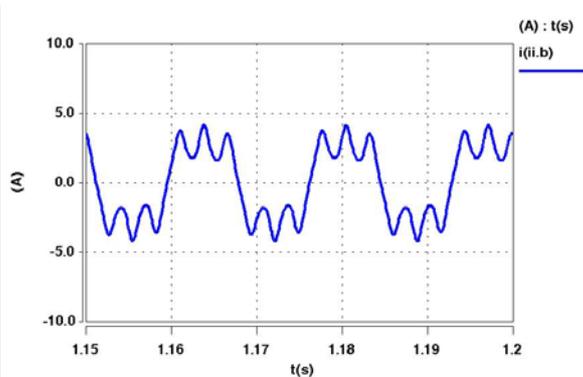
Figura 3.13 - Formas de onda das tensões na entrada do filtro de seqüência positiva e negativa



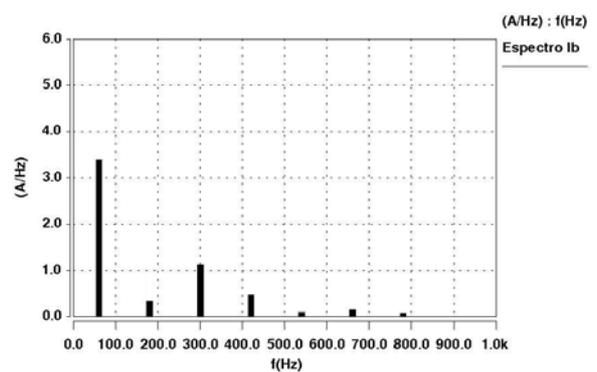
Forma de onda da corrente da linha A



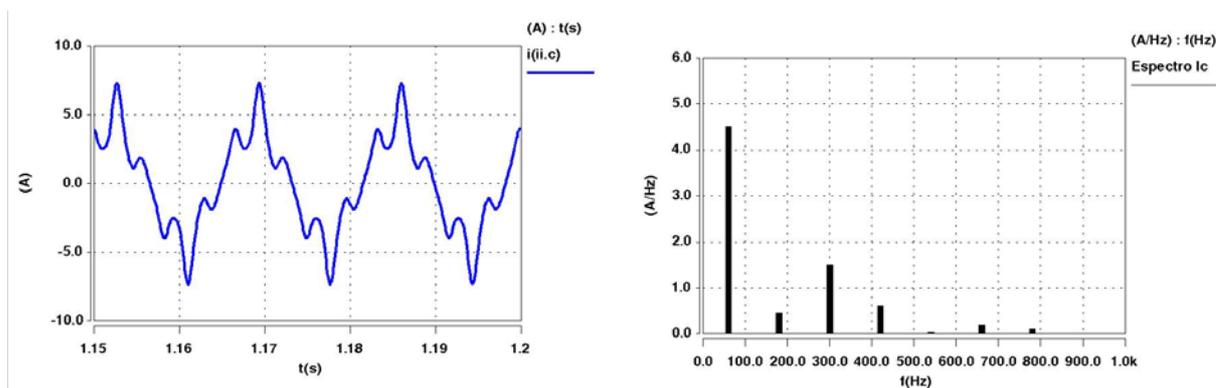
Espectro harmônico da corrente na linha A



Forma de onda da corrente da linha B



Espectro harmônico da corrente na linha B



Forma de onda da corrente da linha C

Espectro harmônico da corrente na linha C

Figura 3.14 - Formas de onda e respectivos espectros harmônicos das correntes de linha na entrada do filtro harmônico de seqüência positiva e negativa

Como se percebe, as fases A e C se apresentam com formas de onda semelhantes, enquanto que a fase B possui formato distinto. O motivo para tal se prende à construção planar das colunas magnéticas, como ocorre para qualquer outro dispositivo magnético trifásico. Em consequência desta forma de montagem física, e do fato do dispositivo não estar conectado ao terra do sistema, as componentes de 3^a ordem observadas nas correntes de fase são de seqüência positiva e negativa, e não de seqüência zero.

3.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo, direcionado à modelagem computacional dos produtos propostos nesta pesquisa, contemplou os seguintes pontos:

- Apresentação das técnicas voltadas para as modelagens mais comumente empregadas para a representação de dispositivos eletromagnéticos para estudos em sistemas elétricos de potência;

- Definição da metodologia a ser utilizada na pesquisa, a qual recaiu sobre a estratégia fundamentada em modelos que utilizam o princípio da relutância magnética e forças magnetomotrizes;
- Obtenção dos modelos específicos para os filtros eletromagnéticos aqui focados e respectivas implementações computacionais na plataforma selecionada para os trabalhos investigativos;
- Avaliações preliminares do desempenho dos modelos computacionais e respectivos programas através de testes iniciais relacionados com o desempenho físico esperado para os dispositivos.

Dentro do exposto, as principais contribuições oferecidas por este capítulo são explicitadas a seguir:

- Apresentação, de forma sucinta, das principais estratégias passíveis de utilização para a modelagem de dispositivos eletromagnéticos e definição da metodologia a ser empregada;
- Estabelecimento dos modelos matemáticos para os filtros eletromagnéticos de seqüência zero e de seqüência positiva e negativa, em consonância com a base computacional escolhida;
- Implementação computacional dos modelos propostos;
- Estudos iniciais avaliativos sobre a eficácia e qualidade da modelagem dos filtros eletromagnéticos investigados na pesquisa.

VALIDAÇÃO DOS MODELOS DOS FILTROS ELETROMAGNÉTICOS

4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A ausência de termos de referência na literatura para fins comprobatórios das estratégias de modelagem computacionais anteriormente apresentadas, conciliada à necessidade do estabelecimento de um processo consistente de validação dos resultados obtidos, consistem na essência deste capítulo.

Dentro deste contexto, este capítulo sintetiza os trabalhos laboratoriais e computacionais feitos para o estabelecimento de termos comparativos entre os resultados indicativos de situações operacionais típicas. Para tanto, foram construídos protótipos dos dispositivos enfocados nesta tese. Assim procedendo e estabelecendo-se a correlação entre as formas de onda e espectros harmônicos obtidos através das duas estratégias estabelecidas, pode-se concluir sobre a eficácia e precisão dos modelos em relação aos desempenhos dos equipamentos reais.

Dentro deste enfoque, o presente capítulo encontra-se estruturado da seguinte forma:

- Definição dos padrões para o suprimento trifásico dos equipamentos;
- Caracterização dos filtros eletromagnéticos construídos para fins deste trabalho;

- Detalhes dos arranjos laboratoriais utilizados;
- Apresentação de resultados experimentais e computacionais para as correntes de linha e respectivos espectros harmônicos;
- Análise dos resultados obtidos computacional e experimentalmente.

4.2 - FILTRO DE SEQÜÊNCIA ZERO

Na seqüência são apresentados: o protótipo do filtro de seqüência zero, o arranjo laboratorial utilizado para os testes e, por fim, os resultados comparativos de desempenho do filtro sob enfoque.

4.2.1 - PROTÓTIPO DO FILTRO DE SEQÜÊNCIA ZERO

O protótipo construído para fins de filtragem de correntes de seqüência zero é mostrado na figura 4.1 e suas características construtivas são apresentadas na tabela 4.1.



Figura 4.1 - Protótipo do filtro eletromagnético de seqüência zero

Tabela 4.1 - Características construtivas e elétricas do protótipo do filtro de seqüência zero

Grandeza	Valor
Tensão fase-fase (V)	220 V
Potência trifásica (S)	2000 VA
Número de espiras dos enrolamentos I e II (n)	133
Seção transversal do núcleo (A)	26,49 cm ²
Fator de empilhamento	0,95
Comprimento médio da coluna magnética (l)	18,1 cm
Comprimento médio das culatras (l _{cul})	3,2 cm
Impedância de dispersão para 60Hz (Z _{disp})	0,1704 Ω

Embora a operação do filtro de seqüência zero ocorra na região linear, é importante a extração de informações relacionadas com a corrente de magnetização do mesmo quando da alimentação nominal. Isto se faz necessário para a obtenção da curva de histerese magnética real do produto, a partir da qual torna-se viável a extração dos parâmetros exigidos pelo modelo do laço de histerese utilizado [54].

Em valores instantâneos, a relação entre a corrente de magnetização do reator (i) e o campo magnético do núcleo (h) é dada pela Lei de Ampère (4.1):

$$h(t) = \frac{n \cdot i(t)}{l_0} \quad (4.1)$$

Onde:

n - Número de espiras do enrolamento do filtro;

*l*₀ - Comprimento médio do caminho magnético [m], dado por: $l_0 = 2 \cdot l + 2 \cdot l_{cul}$;

i - Corrente instantânea de magnetização do reator [A];

h - Intensidade do campo magnético instantâneo [A/m].

Das leis de Faraday e Lenz podem-se escrever as equações (4.2) e (4.3):

$$v(t) = - \frac{n \cdot d\varphi(t)}{dt} \quad (4.2)$$

$$\varphi(t) = - \frac{l}{n} \int_0^t v(t) \quad (4.3)$$

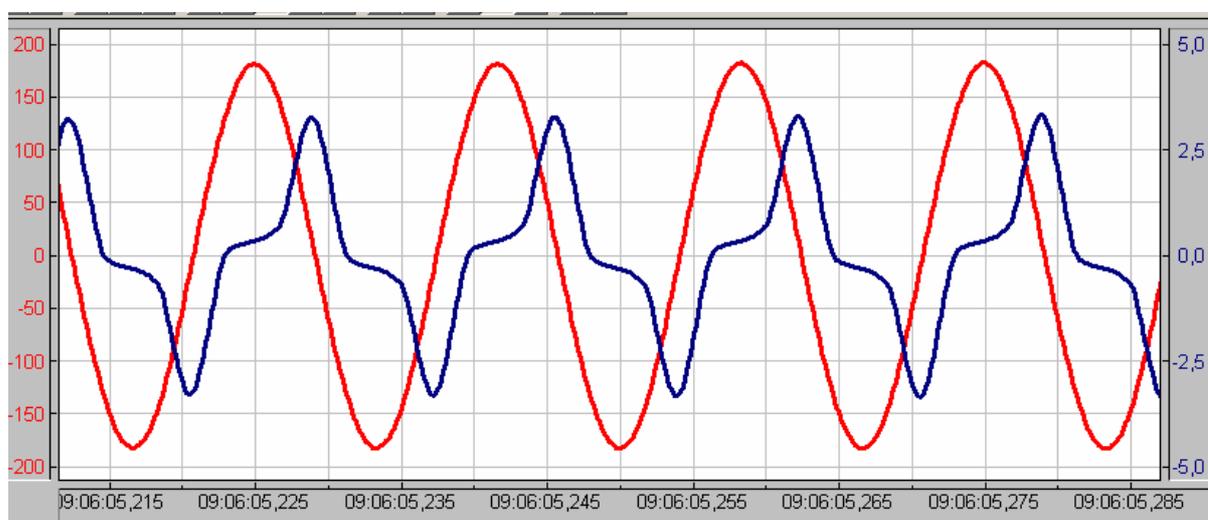
Onde:

$\varphi(t)$ - Fluxo magnético instantâneo;

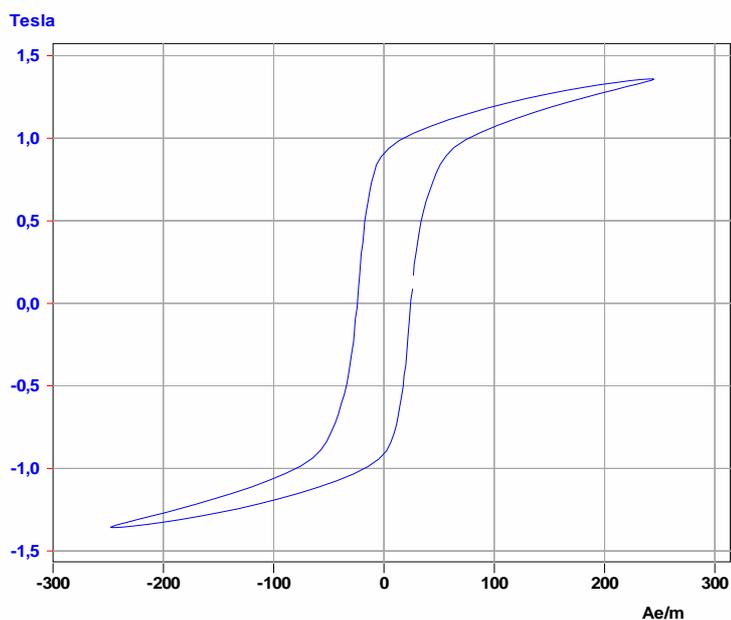
$v(t)$ - Tensão instantânea aplicada ao filtro.

O sinal negativo na equação (4.3) está em concordância com a lei de Lenz. Para fins deste trabalho, o sinal pode ser desconsiderado, uma vez que os desenvolvimentos empregam apenas os valores absolutos.

Utilizando uma excitação magnética associada com a aplicação da tensão nominal do dispositivo, é possível a obtenção do laço de histerese. O fluxo magnético foi obtido pela integração numérica da tensão a partir de um software de processamento de sinais. A figura 4.2 apresenta os resultados experimentais obtidos para: a tensão aplicada ao dispositivo e a corrente de magnetização requerida pelo mesmo (a) e o laço de histerese resultante da combinação destas duas grandezas (b).



(a) Forma de onda da tensão aplicada e da corrente de magnetização do filtro de seqüência zero



(b) Laço de histerese

Figura 4.2 - Formas de onda da tensão, corrente e laço de histerese obtidos no filtro eletromagnético de seqüência zero

Em consonância com os requisitos impostos pelo modelo do laço de histerese empregado pelo programa, a partir das informações anteriores, é viável a extração das grandezas sintetizadas na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características obtidas a partir da curva de histerese do filtro de seqüência zero

Grandeza	Valor
Permeabilidade inicial relativa (μ_i)	1800
Permeabilidade coerciva relativa (μ_{hc})	15120
Densidade de fluxo residual (b_r)	0,9 [T]
Força coerciva (h_c)	35 [Ae/m]
b_{max}	1,64 [T]
h_{max}	422 [Ae/m]
b_{sat}	1,35 [T]
h_{sat}	250 [Ae/m]

4.2.2 - VALIDAÇÃO DA MODELAGEM COMPUTACIONAL

Esta seção apresenta e discute os resultados laboratoriais e computacionais voltados para o processo de validação do filtro de seqüência zero, operando sob condições ideais de funcionamento.

Para tanto, foi montado um arranjo laboratorial constituído, fundamentalmente, por: uma fonte de suprimento trifásica controlada HP6834 de 4,5kVA; uma carga não-linear e; pelo filtro eletromagnético sob enfoque. A carga é constituída por três retificadores monofásicos, formando uma unidade trifásica, com o neutro interligado ao neutro do sistema. Isto permite a circulação dos harmônicos de seqüência zero, conforme requerido pela metodologia aqui contemplada. A figura 4.3 mostra o arranjo laboratorial utilizado para o ensaio do protótipo, enquanto que a figura 4.4 é indicativa do correspondente diagrama unifilar.

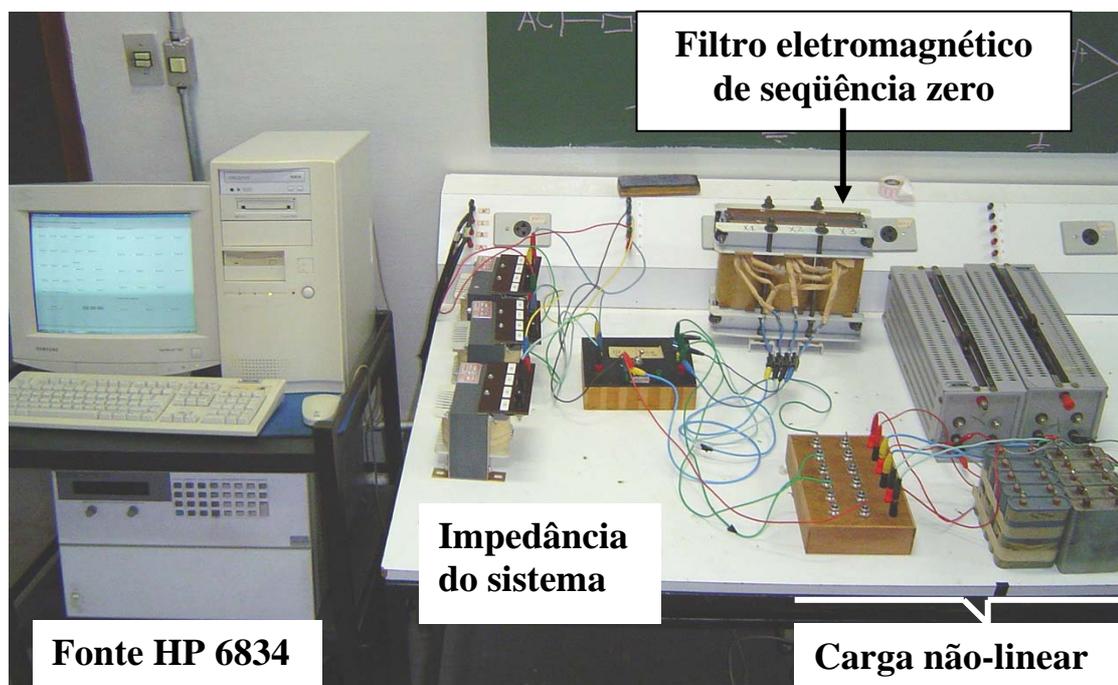


Figura 4.3 - Arranjo experimental para os ensaios do filtro eletromagnético de seqüência zero

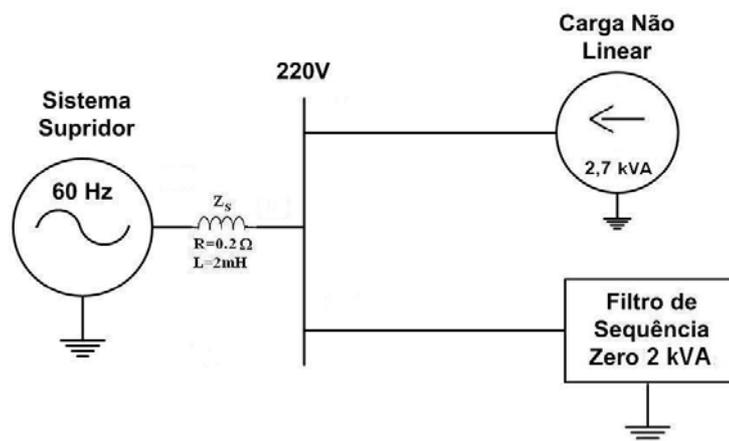


Figura 4.4 - Diagrama unifilar correspondente à figura 4.3

Os pontos de monitoração selecionados, as grandezas registradas e as correspondentes figuras ilustrativas são sintetizados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Síntese das medições utilizadas para validação do modelo computacional - filtro de seqüência zero

Local da medição	Resultado apresentado	Figura
(a) Carga não-linear	Correntes de fase A, B e C	4.7
	Espectro harmônico A, B e C	4.8
(b) Alimentador	Correntes de fase A, B e C	4.9
	Espectro harmônico A, B e C	4.10
(c) Filtro de seqüência zero	Correntes de fase A, B e C	4.11
	Espectro harmônico A, B e C	4.12

O registro destas grandezas foi realizado através do sistema de aquisição de dados identificado na figura 4.6 e constituído por:

- Sensores e canais de entrada: 3 ponteiras de tensão e 9 *clamp's* de corrente (total de 12 canais) destinados a enviar os sinais elétricos externos à placa de aquisição;

- Placa de aquisição: recebe os sinais provenientes dos sensores e canais de entrada e realiza a digitalização dos sinais (conversão A/D). O cartão, do fabricante Quatech, modelo DAQP-12, é uma placa de controle e aquisição de dados para computadores e *notebooks*, com taxa de amostragem de 100kHz. A foto do cartão utilizado é mostrada na figura 4.5.



Figura 4.5 - Foto ilustrativa do cartão de aquisição de dados DAQP-12

- Notebook: após a obtenção dos dados digitais que representam os sinais amostrados, o microcomputador armazena em memória os sinais na forma de janelas. Durante o processo de medição, estes dados são armazenados em disco rígido, através do software de controle e processamento de sinais DasyLab 4.0 - IOTec. As janelas de sinais se referem à aquisição digital de acordo com a taxa de amostragem selecionada. Neste caso, utilizou-se 128 pontos representando 1 ciclo de medição.

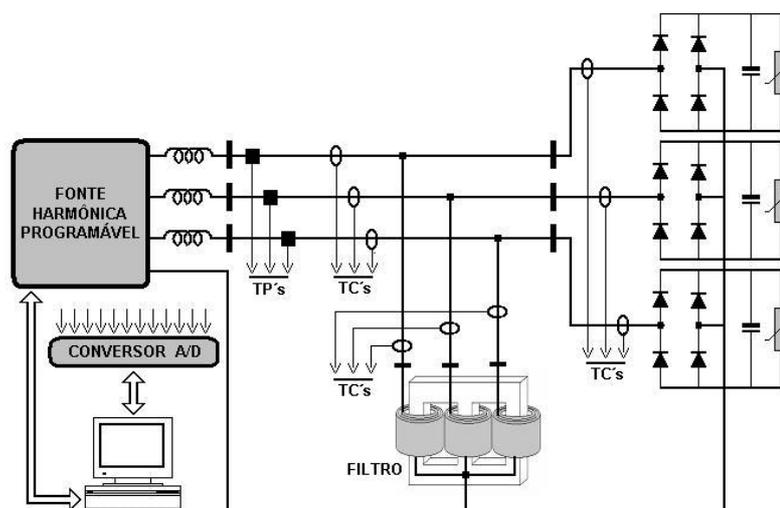
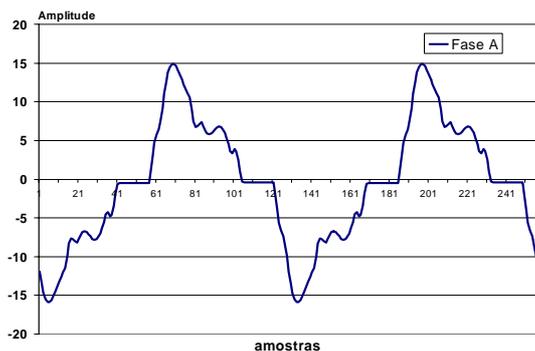


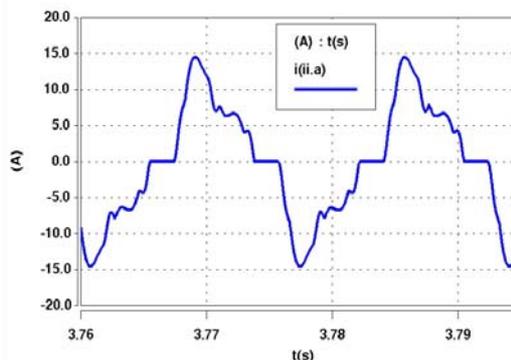
Figura 4.6 - Diagrama trifásico utilizado para o registro das grandezas elétricas

(a) Corrente na carga não-linear

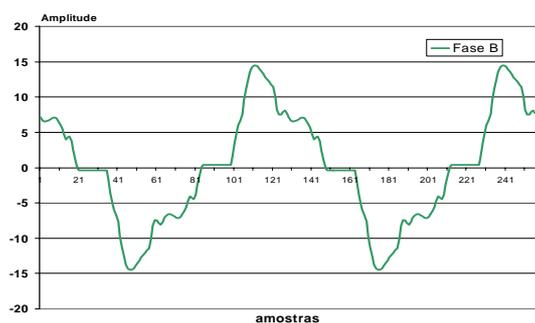
A figura 4.7 apresenta, respectivamente, as correntes de linha A, B e C na entrada da carga não-linear. Ambos os resultados, experimental e computacional, são adicionados para fins de inspeção visual e estabelecimento dos termos comparativos.



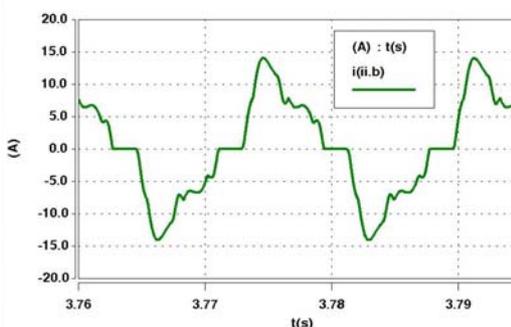
Linha A - carga não-linear - experimental



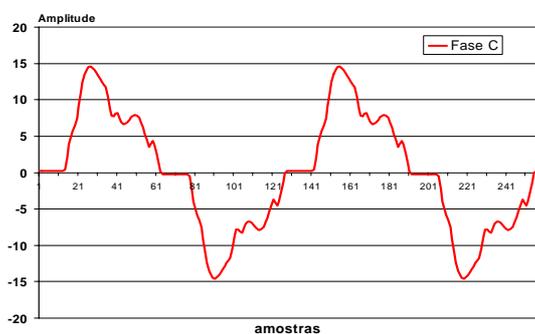
Linha A - carga não-linear - computacional



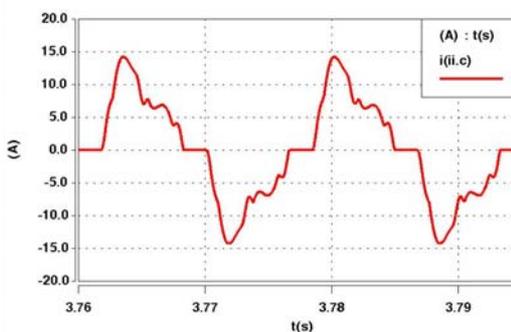
Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional



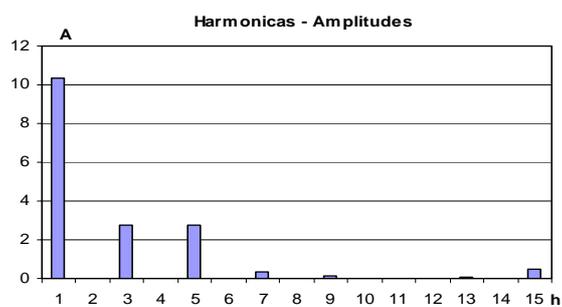
Linha C - carga não-linear - experimental



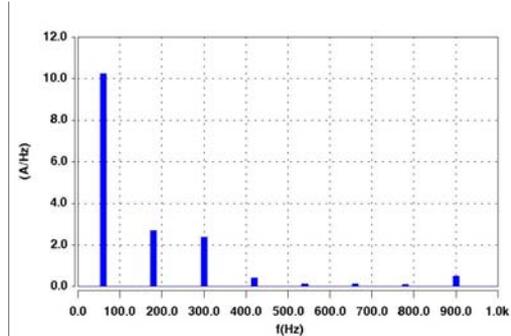
Linha C - carga não-linear - computacional

Figura 4.7 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência zero

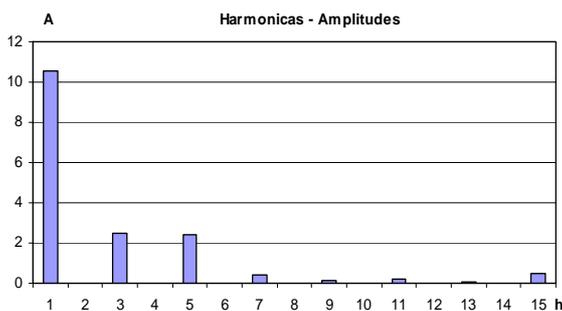
Complementarmente, a figura 4.8 fornece os correspondentes espectros de frequência para as correntes de pico anteriores.



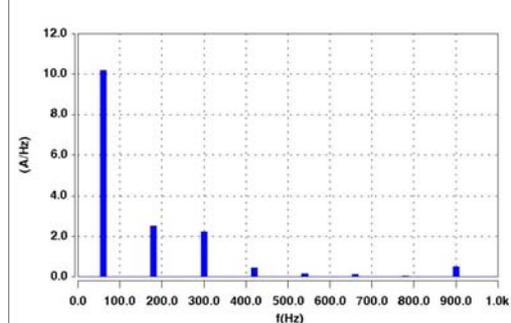
Linha A - carga não-linear - experimental



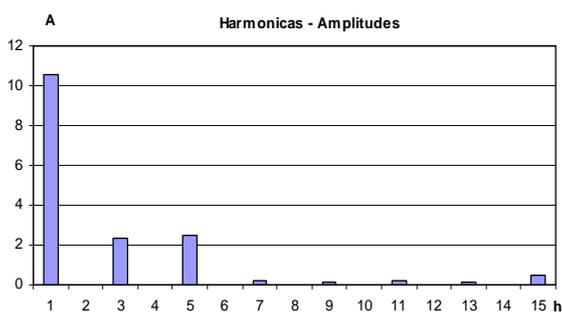
Linha A - carga não-linear - computacional



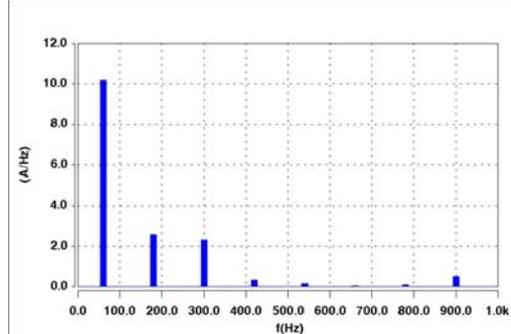
Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional



Linha C - carga não-linear - experimental

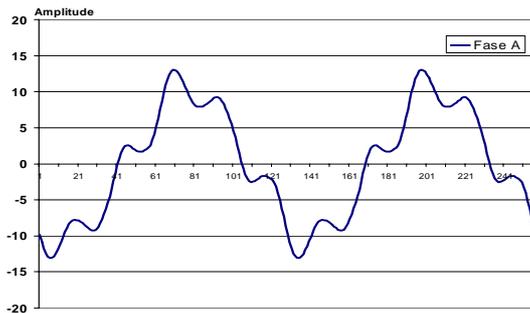


Linha C - carga não-linear - computacional

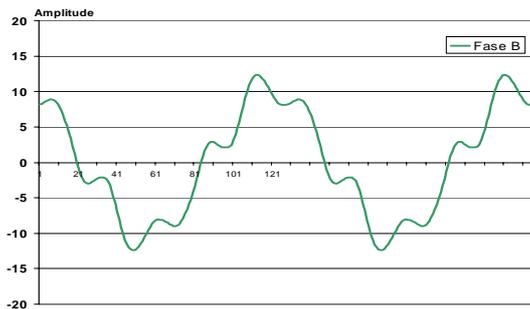
Figura 4.8 - Espectros harmônicos das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência zero

(b) Corrente de linha no alimentador

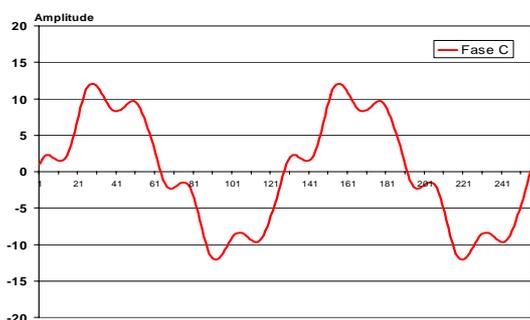
A figura 4.9 apresenta, respectivamente, as correntes nas linhas A, B e C no alimentador. Novamente, os resultados experimental e computacional são destacados para os fins aqui almejados.



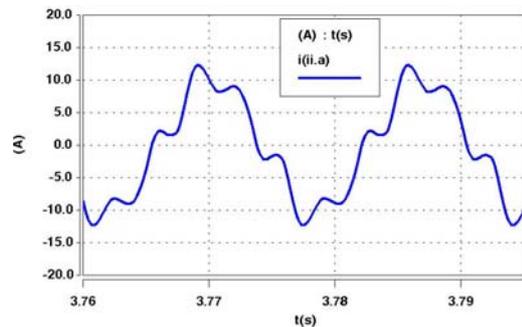
Linha A - alimentador - experimental



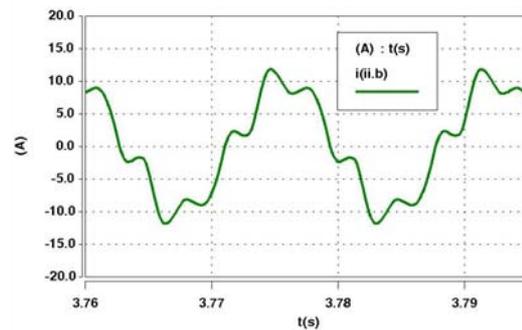
Linha B - alimentador - experimental



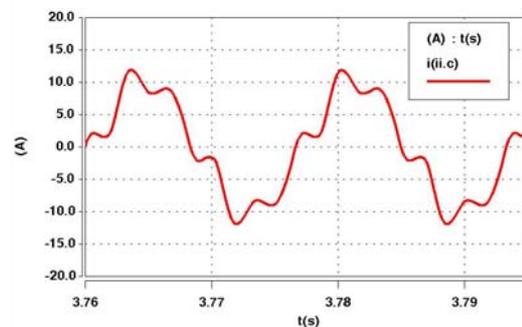
Linha C - alimentador - experimental



Linha A - alimentador - computacional



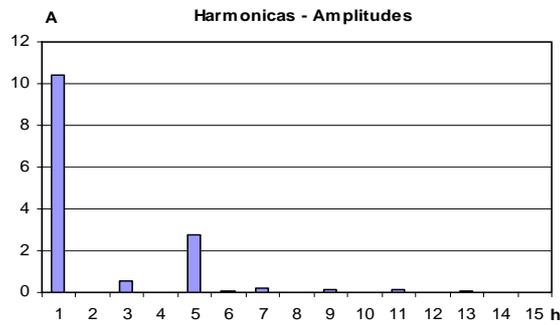
Linha B - alimentador - computacional



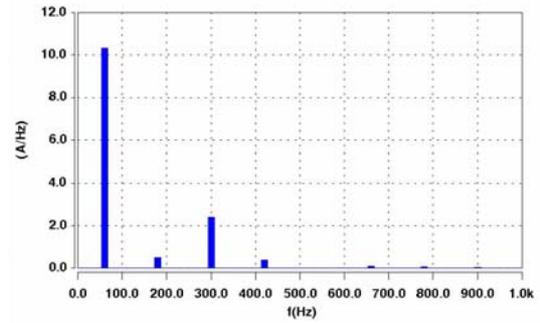
Linha C - alimentador - computacional

Figura 4.9 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência zero

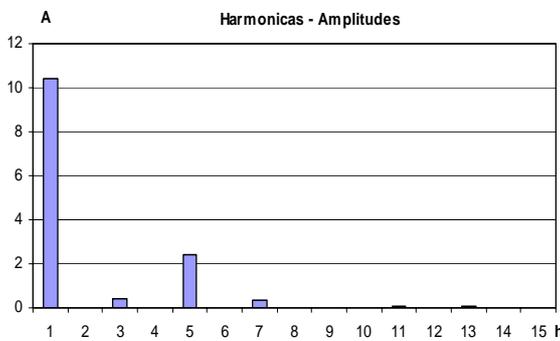
Complementarmente, a figura 4.10 é indicativa dos espectros harmônicos das correntes de pico na alimentação, obtidos de forma experimental e computacional, respectivamente.



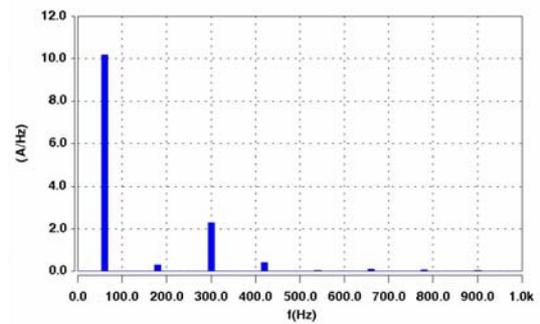
Linha A - alimentador - experimental



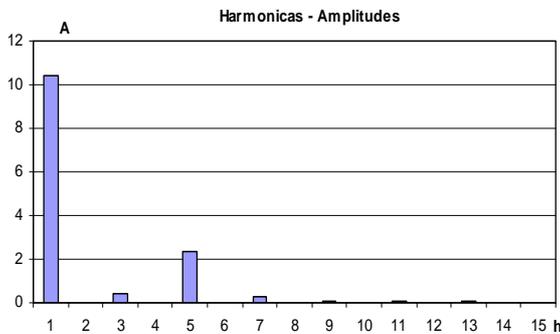
Linha A - alimentador - computacional



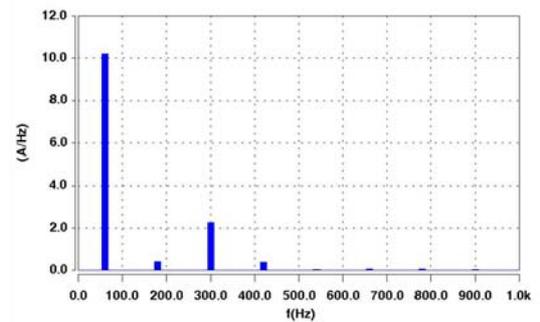
Linha B - alimentador - experimental



Linha B - alimentador - computacional



Linha C - alimentador - experimental

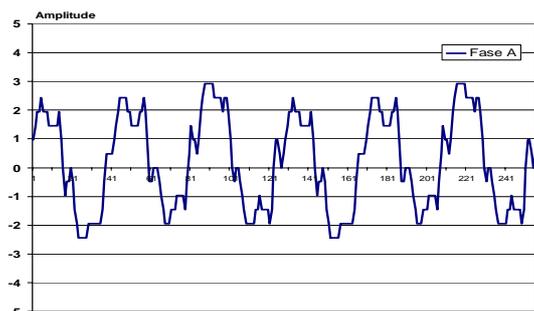


Linha C - alimentador - computacional

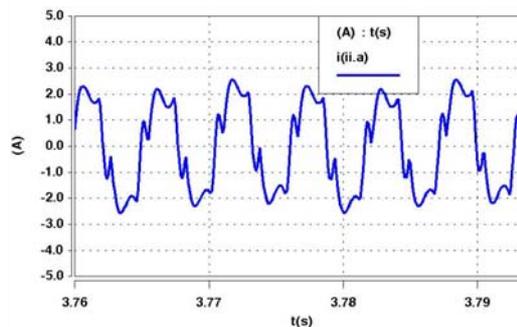
Figura 4.10 - Espectros harmônicos das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência zero

(c) Corrente de linha no filtro de seqüência zero

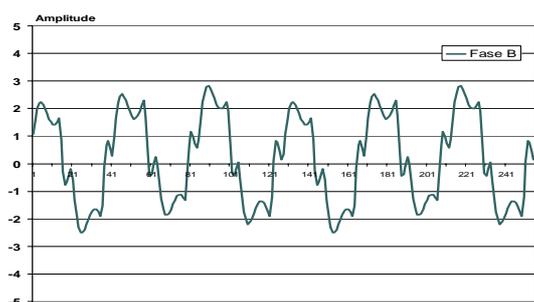
Por fim, a figura 4.11 apresenta as correntes de linha A, B e C no filtro eletromagnético. Objetivando, mais uma vez, o estabelecimento de termos comparativos, ambos os resultados, experimental e computacional, são evidenciados.



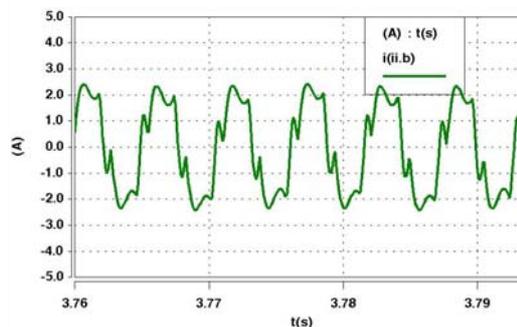
Linha A - filtro - experimental



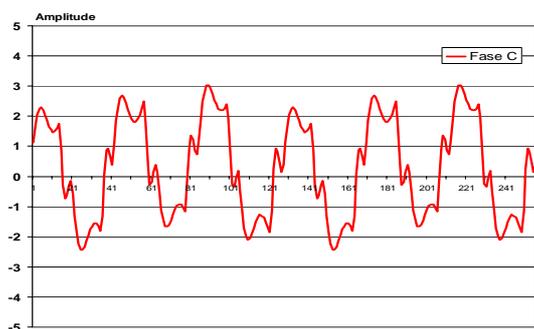
Linha A - filtro - computacional



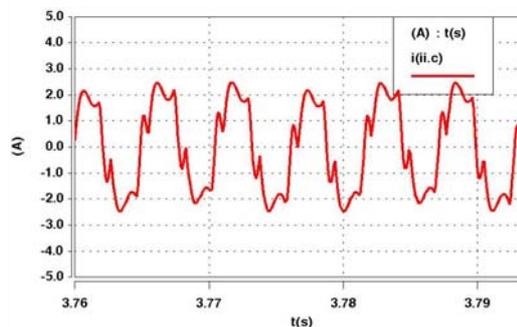
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



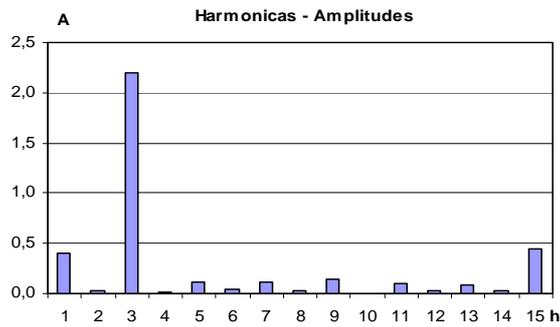
Linha C - filtro - experimental



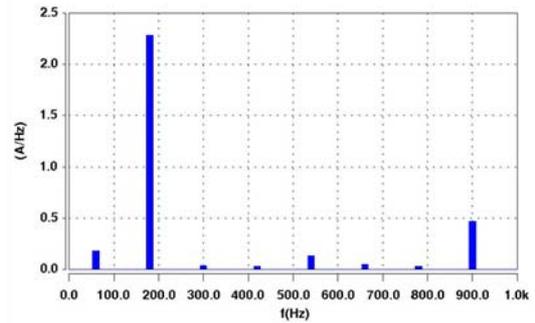
Linha C - filtro - computacional

Figura 4.11 - Formas de onda das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência zero

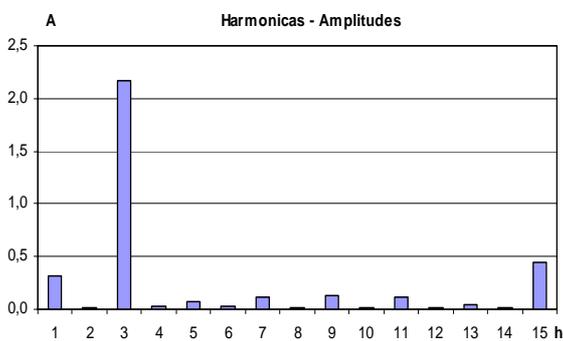
Ainda, a figura 4.12 indica os correspondentes espectros harmônicos.



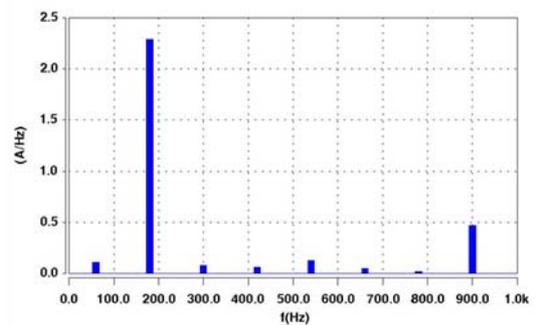
Linha A - filtro - experimental



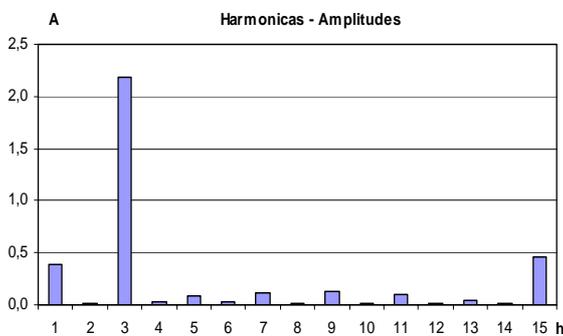
Linha A - filtro - computacional



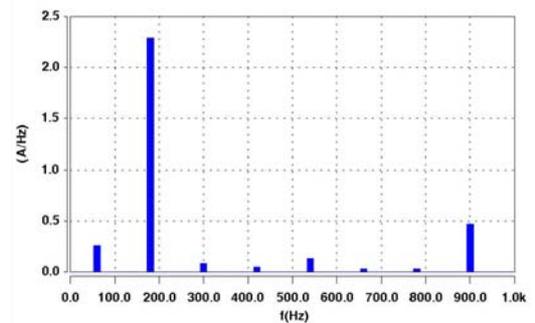
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



Linha C - filtro - experimental



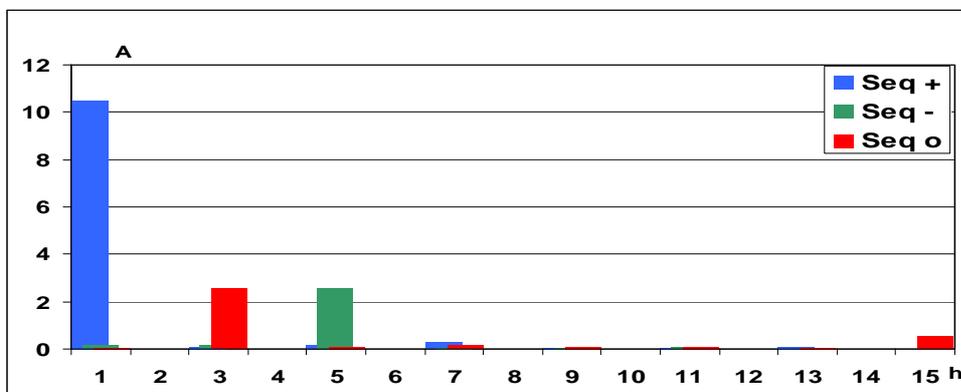
Linha C - filtro - computacional

Figura 4.12 - Espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência zero

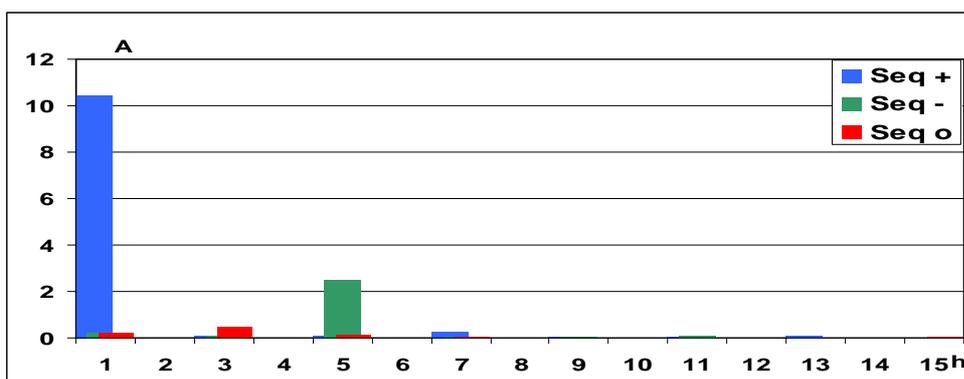
(d) Síntese das correntes de linha de acordo com as suas seqüências de fase

Objetivando fornecer maiores detalhes do desempenho do filtro, a figura 4.13 apresenta os espectros harmônicos com a distribuição de seqüências positivas, negativas e zero das

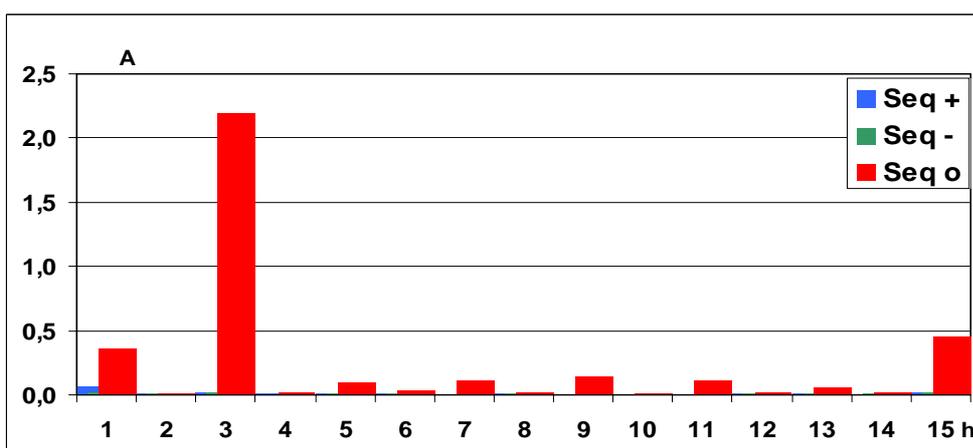
correntes de pico nos mesmos pontos analisados anteriormente. Apenas os resultados experimentais são considerados e as cores destacam a seqüência de fases da componente harmônica sob foco.



(a) Seqüência de fases para as correntes de linha na carga - experimental



(b) Seqüência de fases para as correntes de linha no alimentador - experimental

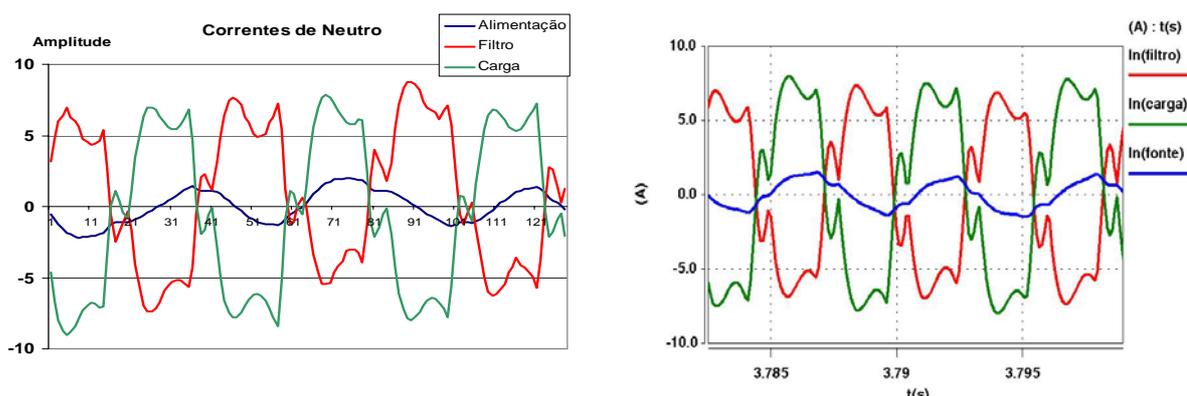


(c) Seqüência de fases para as correntes de linha no filtro - experimental

Figura 4.13 - Espectros harmônicos com distribuição seqüencial de fases para as correntes de linha na carga não-linear, no alimentador e no filtro - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência zero

(e) Corrente no neutro da carga não-linear, alimentador e filtro

De modo a proporcionar meios para uma melhor visualização da eficácia do filtro e ainda, constatar a operacionalidade do mesmo no que tange à absorção das componentes de seqüência zero, apresenta-se, a seguir, os resultados associados com as *correntes no neutro* para as três partes envolvidas no processo: carga, alimentador e filtro. A figura 4.14 ressalta que a corrente de neutro ficou praticamente confinada à malha de circulação formada pela carga e filtro. O resíduo de corrente ainda circulante pelo neutro do alimentador está associado aos fenômenos já discutidos anteriormente.



Correntes de neutro - experimental

Correntes de neutro - computacional

Figura 4.14 - Formas de onda das correntes de neutro na carga, no alimentador e no filtro - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência zero

4.2.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

A tabela 4.4 resume os principais resultados anteriores e permite uma análise do processo de validação como um todo.

Tabela 4.4 - Síntese comparativa dos resultados da operação do filtro eletromagnético de seqüência zero sob condições ideais de suprimento

Local	Grandeza		Simulação			Experimental			Diferença (%)		
			A	B	C	A	B	C	A	B	C
Corrente na carga não-linear	Valor eficaz (A)		7,7	7,6	7,6	7,8	7,8	7,8	1,3	2,6	2,6
	Harmônicas mais significativas (%)	3 ^a	26,3	24,7	24,9	26,7	23,4	22,9	1,5	5,5	8,7
		5 ^a	23,3	21,9	22,6	24,4	22,6	23,4	4,5	3,1	3,4
		7 ^a	3,6	4,2	3,5	3,4	3,9	3,1	5,9	7,7	12,9
	DIHT (%)		36,1	33,8	34,4	38,3	33,4	33,1	5,7	1,2	3,9
Corrente no alimentador	Valor eficaz (A)		7,5	7,4	7,4	7,6	7,6	7,6	1,3	2,6	2,6
	Harmônicas mais significativas (%)	3 ^a	5,1	4,0	4,1	5,6	4,2	4,2	8,9	4,8	2,4
		5 ^a	23,1	22,4	22	26,1	23,3	22,9	11,5	3,9	3,9
		7 ^a	3,3	4,1	3,0	2,9	3,7	2,9	13,8	10,8	3,4
	DIHT (%)		25	23,1	23,1	26,9	23,9	23,5	7,1	3,3	1,7
Corrente no filtro eletromagnético	Valor eficaz (A)		1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	6,3	6,3	6,3
	Harmônicas mais significativas pico (A)	3 ^a	2,3	2,3	2,3	2,2	2,2	2,2	4,5	4,5	4,5
		9 ^a	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12	0	8,3	8,3
		15 ^a	0,47	0,47	0,47	0,46	0,46	0,47	2,2	2,2	0

Focando especificamente os resultados mostrados anteriormente para uma das linhas do sistema trifásico, constata-se que:

- As correntes harmônicas injetadas pela carga não-linear se apresentam com conteúdos harmônicos responsáveis por distorções totais em torno de 38,3%;
- Quando da inserção do filtro de seqüência zero, a nova distorção total da corrente de linha do lado do supridor passou para 26,9%. Vale ressaltar que esta proporção corresponde, praticamente, ao conteúdo de 5º harmônico, a qual, como se sabe, não

se constitui numa frequência factível de filtragem pelo dispositivo aqui considerado.

Todavia, a redução de cerca de 30% da distorção harmônica total de corrente já evidencia um substancial ganho advindo da filtragem ora considerada;

- No que tange às correntes encontradas nas linhas do filtro, constatou-se, como seria esperado, que o dispositivo demonstrou sua eficácia no sentido de absorver as componentes harmônicas de seqüência zero, promovendo, assim, a atenuação da injeção harmônica no alimentador;
- Os resultados computacionais e experimentais, de um modo geral, evidenciaram uma boa correlação quantitativa e qualitativa, como observado através das formas de onda e valores obtidos. Desta forma, fica evidenciado que o processo de validação da modelagem computacional apresentou um bom desempenho no sentido de representar a operação do dispositivo focado nesta fase da pesquisa, qual seja, o filtro de seqüência zero.

Deve-se ressaltar que, embora os resultados computacionais e experimentais apresentem boa concordância, é de se esperar alguns desvios que possam justificar diferenças de resultados. Estes são, dentre outros motivos: imprecisões paramétricas, negligências de componentes parasitas, erros do sistema de medição e aquisição de dados, modelagem de alguns dispositivos como ideais, etc.. Todavia, de um modo geral, não se constatou maiores discrepâncias que viessem a comprometer o processo de validação efetivado.

4.3 - FILTRO DE SEQÜÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA

As análises que seguem estão imbuídas do propósito de se avaliar as características elétricas e magnéticas do filtro de seqüência positiva e negativa, assim como também dos estudos de seu desempenho operacional.

Objetivando o atendimento a tais metas, são apresentados a seguir:

- O protótipo do filtro;
- O arranjo laboratorial utilizado para os testes;
- Os resultados comparativos de desempenho do mesmo.

4.3.1 - PROTÓTIPO DO FILTRO DE SEQÜÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA

O protótipo construído para fins de filtragem de correntes de seqüência positiva e negativa é mostrado na figura 4.15. Suas características construtivas são apresentadas na tabela 4.5.



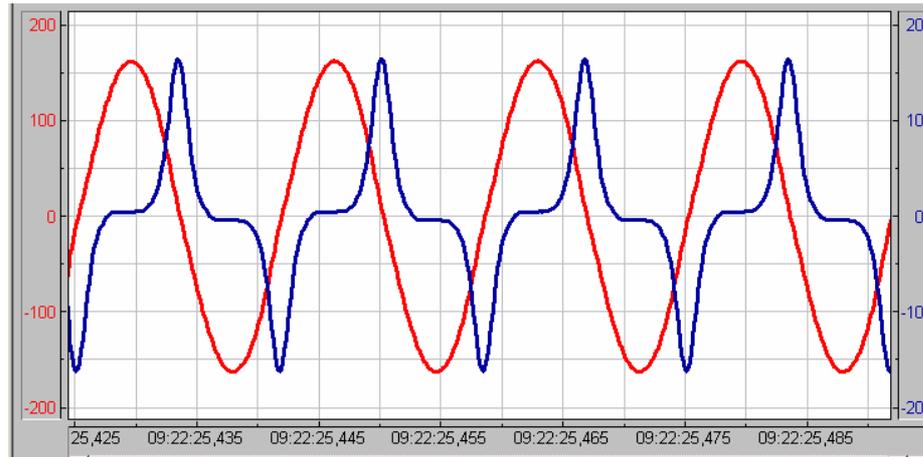
Figura 4.15 - Protótipo do filtro eletromagnético de seqüência positiva e negativa

Tabela 4.5 - Características construtivas e elétricas do protótipo do filtro de seqüência positiva e negativa

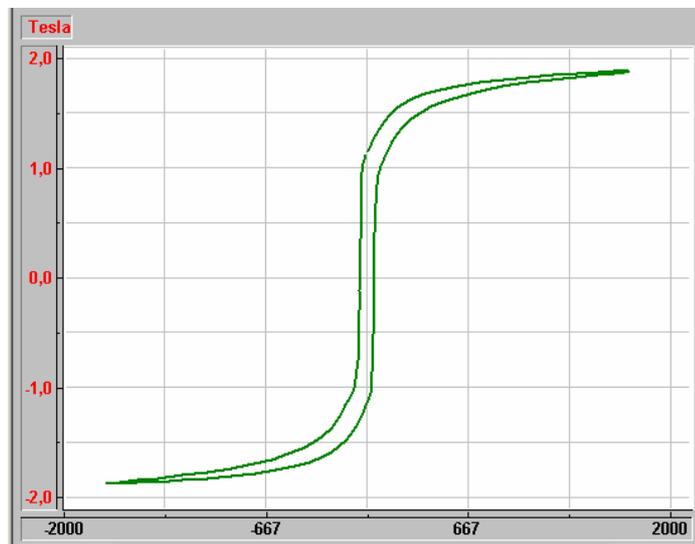
Grandeza	Valor
Tensão fase-fase (V)	190 V
Potência trifásica (S)	3000 VA
Número de espiras	116
Seção transversal do núcleo (A)	19,488 cm ²
Fator de empilhamento	0,95
Comprimento médio da coluna magnética (l)	19,5 cm
Comprimento médio das culatras (l_{cul})	8,0 cm

De modo a prosseguir com as análises, tal como aconteceu para o filtro de seqüência zero, o primeiro passo consiste na obtenção das informações relacionadas com a corrente de magnetização do filtro de seqüência positiva e negativa, quando o dispositivo encontra-se suprido por uma tensão nominal e ideal. Esta medida é relevante ao processo de obtenção da curva de histerese magnética real do produto, visto que o funcionamento do mesmo como filtro harmônico se fundamenta justamente na sua operação sob condições saturadas. A partir da curva de histerese, torna-se viável a extração dos parâmetros exigidos pelo modelo do laço de histerese utilizado [54].

Reportando às equações 4.1, 4.2 e 4.3 e utilizando uma excitação magnética associada com a aplicação da tensão nominal do dispositivo, obtêm-se as formas de onda do processo de excitação e o laço de histerese, indicados nas figuras 4.16(a) e (b).



(a) Forma de onda da tensão aplicada e da corrente de magnetização do filtro de seqüência positiva e negativa



(b) Laço de histerese

Figura 4.16 - Formas de onda da tensão, corrente e laço de histerese obtidos no filtro eletromagnético de seqüência positiva e negativa

Com base nos requisitos impostos pelo modelo do laço de histerese empregado pelo programa e a partir das informações da tabela 4.5, torna-se possível a extração das grandezas sintetizadas na tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Características obtidas a partir da curva de histerese do filtro de seqüência positiva e negativa

Grandeza	Valor
Permeabilidade inicial relativa (μ_i)	2500
Permeabilidade coerciva relativa (μ_{hc})	60000
Densidade de fluxo residual (b_r)	1,2 [T]
Força coerciva (h_c)	79 [Ae/m]
b_{\max}	1,8 [T]
h_{\max}	1700 [Ae/m]
b_{sat}	1,7 [T]
h_{sat}	1000 [Ae/m]

4.3.2 - VALIDAÇÃO DA MODELAGEM COMPUTACIONAL

Prosseguindo com os estudos, as análises a seguir avaliam os resultados laboratoriais e computacionais, objetivando, principalmente, o processo de validação do filtro de seqüência positiva e negativa, operando sob condições ideais.

Para tanto, foi montado um arranjo laboratorial constituído, fundamentalmente, por:

- Uma fonte de suprimento trifásica controlada HP6834 de 4,5kVA (mesma utilizada nos estudos anteriores);
- Uma carga não-linear;
- O filtro eletromagnético sob enfoque com o dispositivo defasador conectado em série com o mesmo.

A carga não-linear é constituída por um retificador trifásico não-controlado, cujo conteúdo harmônico presente nas correntes é dado por $6k \pm 1$, sendo $k \in \Gamma^+$. Dessa forma, as

principais componentes harmônicas são de 5^a e 7^a ordens, conforme requerido pela metodologia aqui contemplada.

A figura 4.17 mostra o arranjo laboratorial utilizado para o ensaio do protótipo, enquanto que a figura 4.18 é indicativa do correspondente diagrama unifilar.

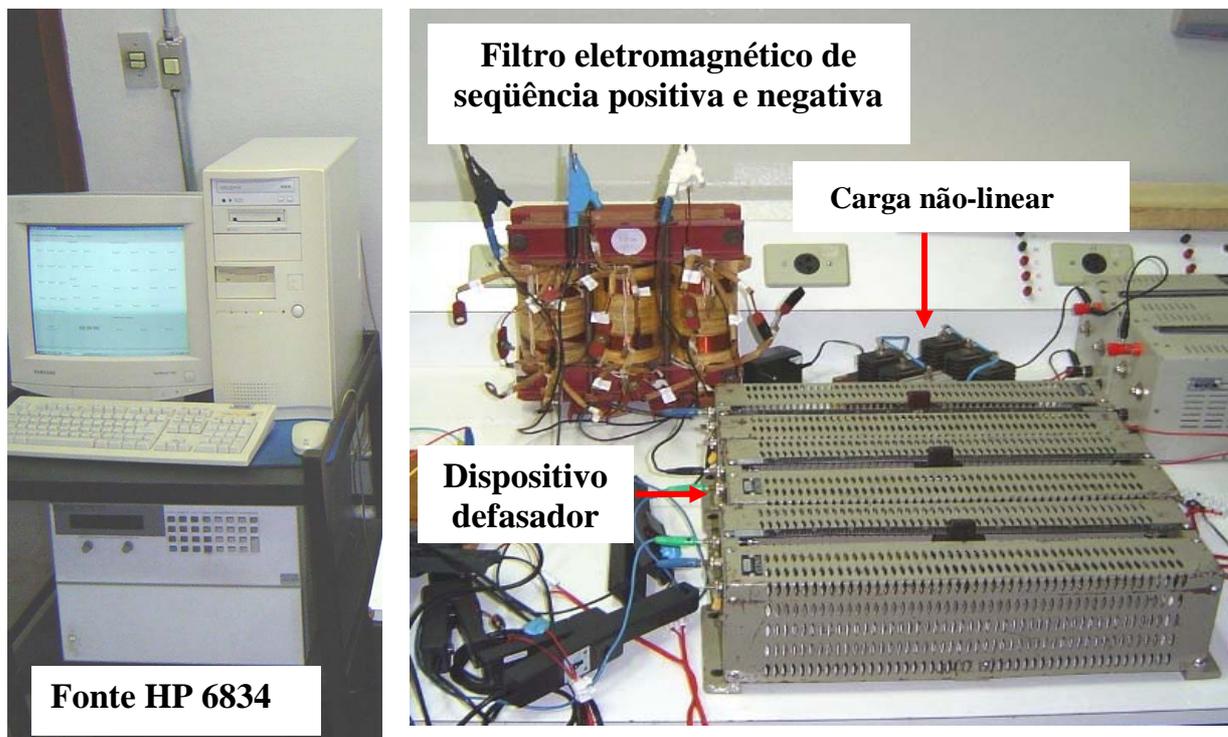


Figura 4.17 - Arranjo experimental para os ensaios do filtro eletromagnético de seqüência positiva e negativa

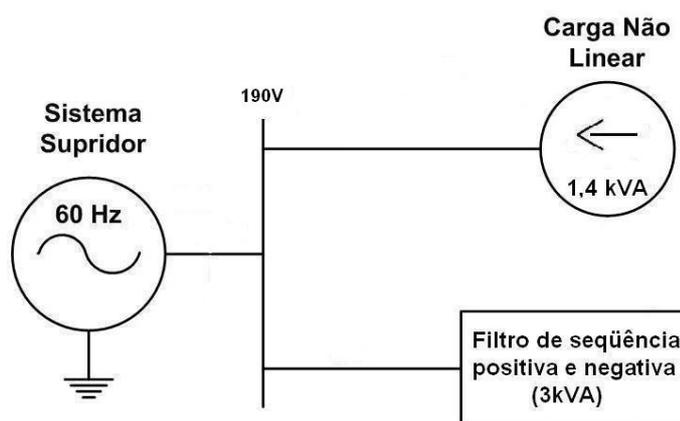


Figura 4.18 - Diagrama unifilar correspondente à figura 4.17

Os pontos de monitoração selecionados, as grandezas registradas e as correspondentes figuras ilustrativas são sintetizados na tabela 4.7. Estas grandezas foram monitoradas utilizando o mesmo sistema de aquisição de dados apresentado anteriormente, dispensando, portanto, maiores detalhes nesta seção.

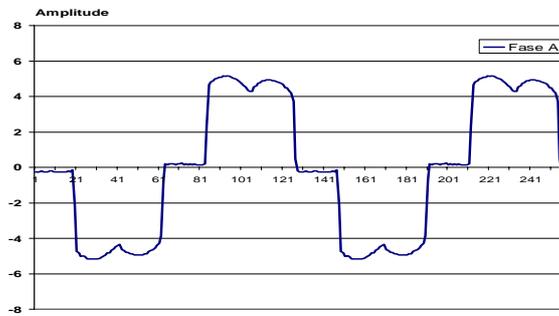
Tabela 4.7 - Síntese das medições utilizadas para validação do modelo computacional - filtro de seqüência positiva e negativa

Local da medição	Resultado apresentado	Figura
(a) Carga não-linear	Correntes de fase A, B e C	4.19
	Espectro harmônico A, B e C	4.20
(b) Alimentador	Correntes de fase A, B e C	4.21
	Espectro harmônico A, B e C	4.22
(c) Filtro de seqüência positiva e negativa	Correntes de fase A, B e C	4.23
	Espectro harmônico A, B e C	4.24

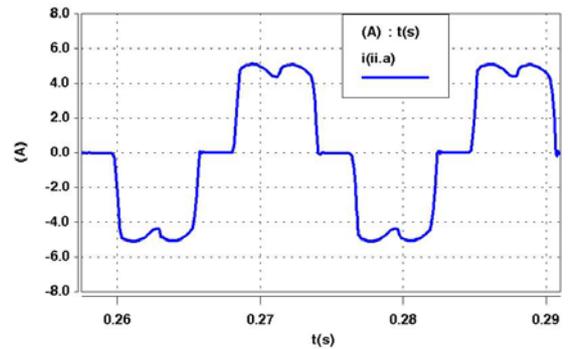
(a) Corrente na carga não-linear

A figura 4.19 apresenta, respectivamente, as correntes de linha A, B e C na carga não-linear. Tal como foram apresentados para a estratégia de filtragem de seqüência zero, ambos os resultados, experimental e computacional, são adicionados para fins de inspeção visual e estabelecimento dos termos comparativos.

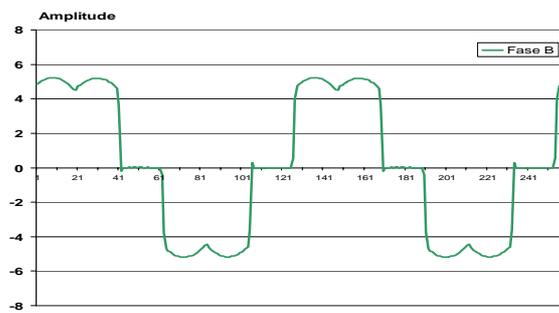
Complementarmente, a figura 4.20 fornece os correspondentes espectros de freqüência para as correntes de pico anteriores.



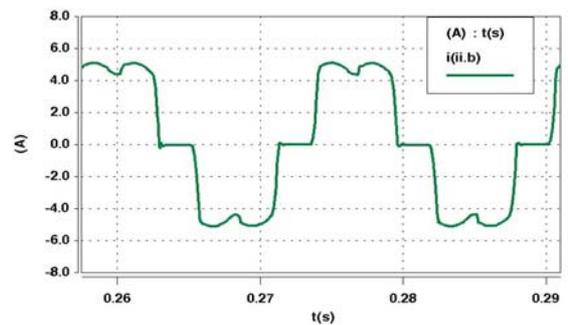
Linha A - carga não-linear - experimental



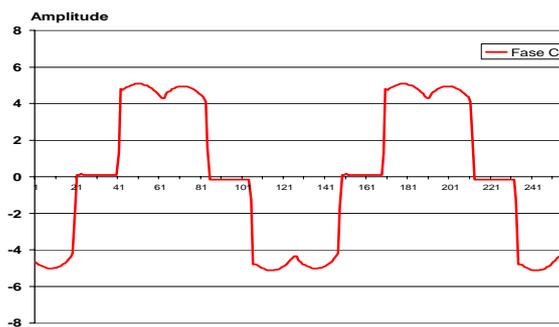
Linha A - carga não-linear - computacional



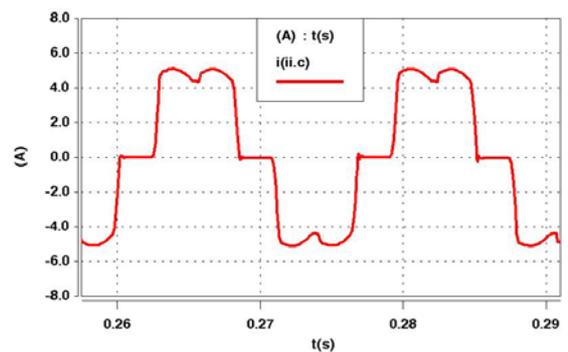
Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional

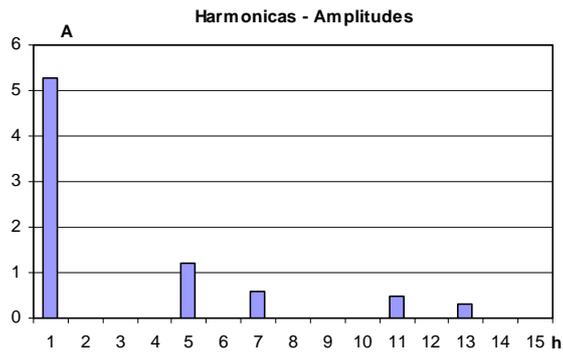


Linha C - carga não-linear - experimental

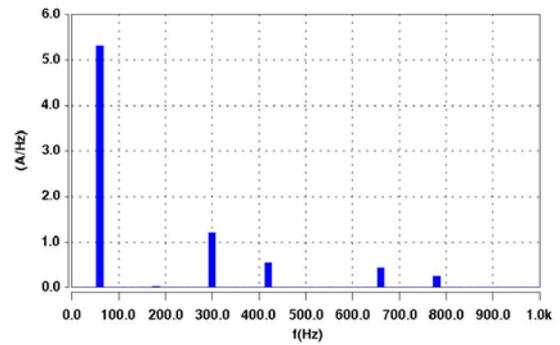


Linha C - carga não-linear - computacional

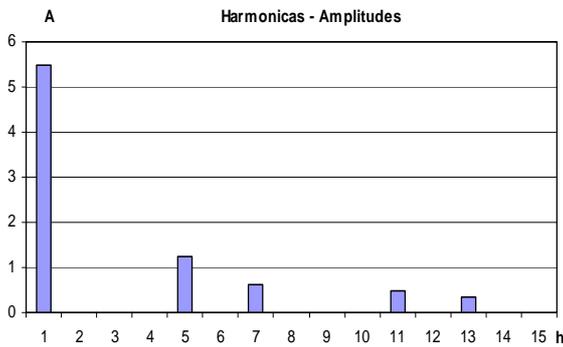
Figura 4.19 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência positiva e negativa



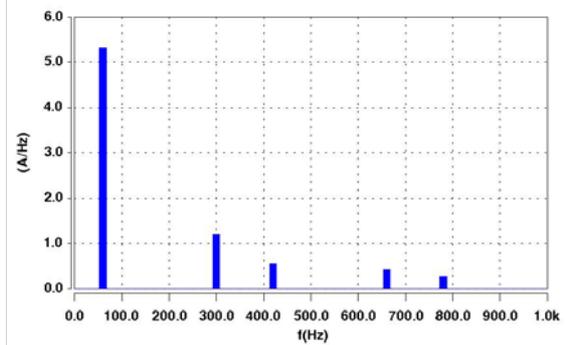
Linha A - carga não-linear - experimental



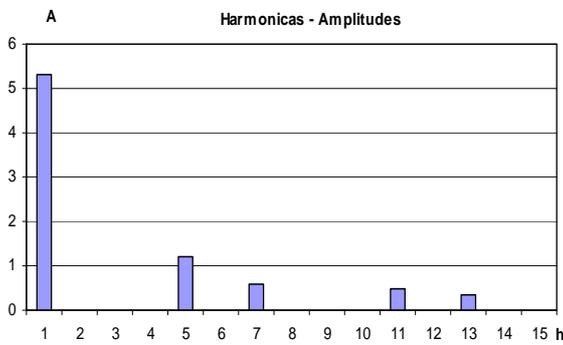
Linha A - carga não-linear - computacional



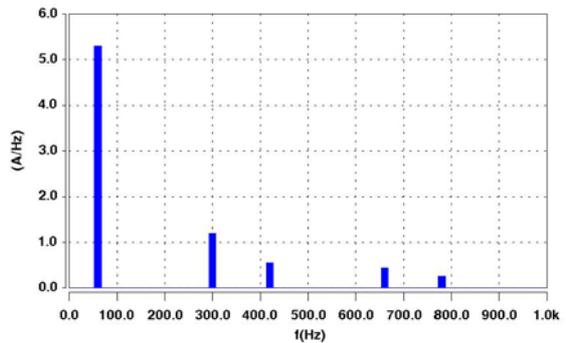
Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional



Linha C - carga não-linear - experimental

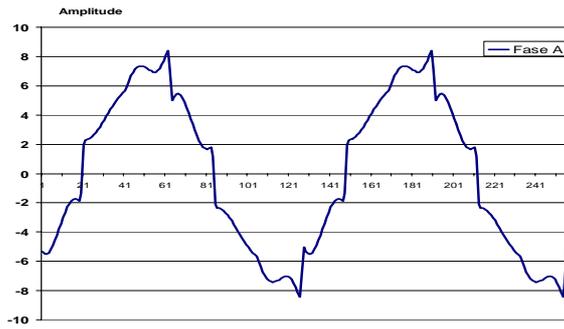


Linha C - carga não-linear - computacional

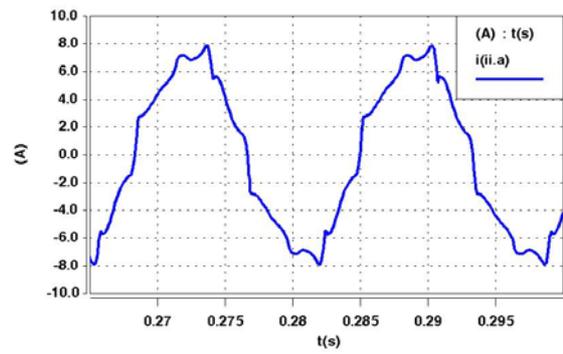
Figura 4.20 - Espectros harmônicos das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência positiva e negativa

(b) Corrente de linha no alimentador

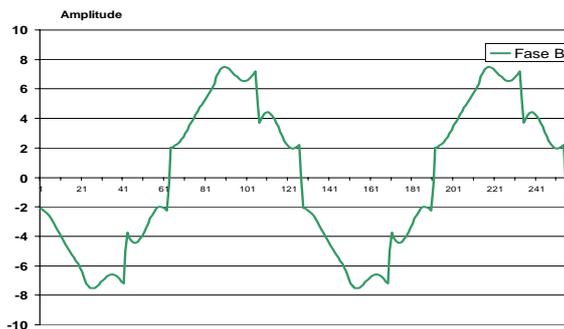
As correntes de linha no alimentador, fornecidas pelas figuras 4.21 mostram os resultados experimentais e computacionais.



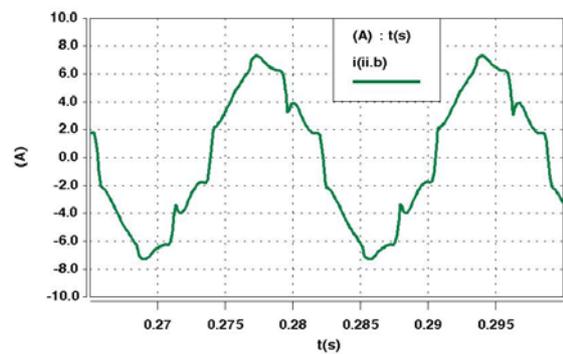
Linha A - alimentador - experimental



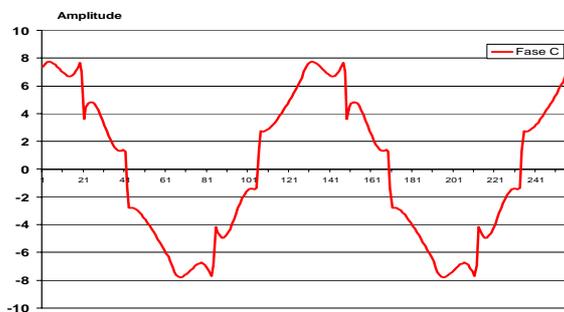
Linha A - alimentador - computacional



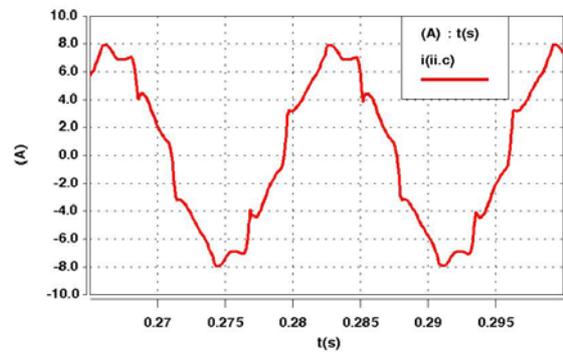
Linha B - alimentador - experimental



Linha B - alimentador - computacional



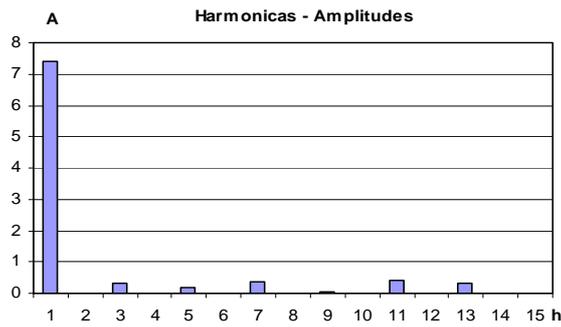
Linha C - alimentador - experimental



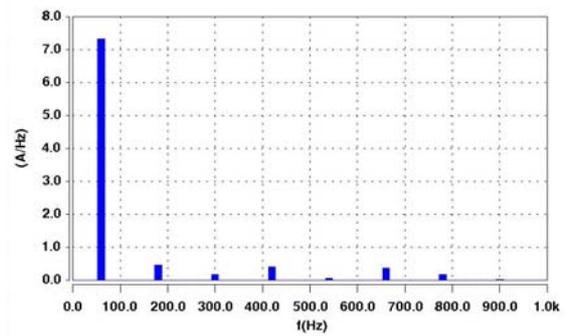
Linha C - alimentador - computacional

Figura 4.21 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência positiva e negativa

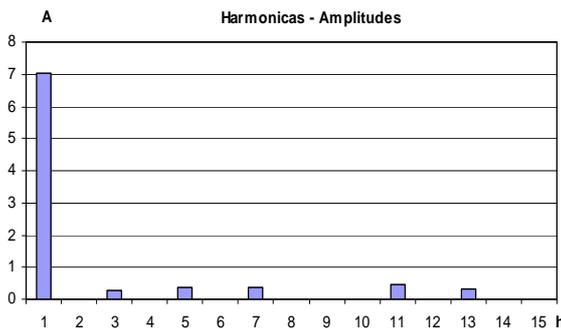
Complementarmente, a figura 4.22 é indicativa dos espectros harmônicos das correntes de pico no alimentador, obtidos de forma experimental e computacional, respectivamente.



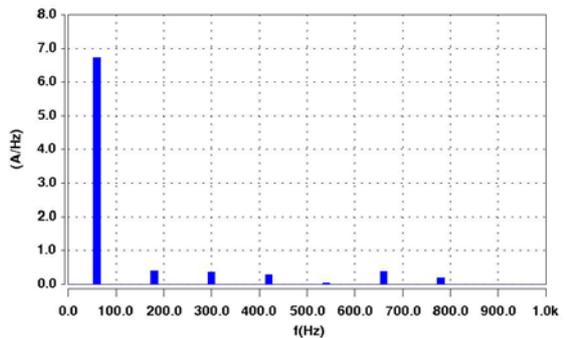
Linha A - alimentador - experimental



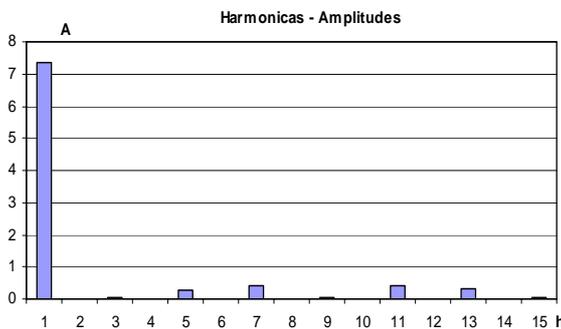
Linha A - alimentador - computacional



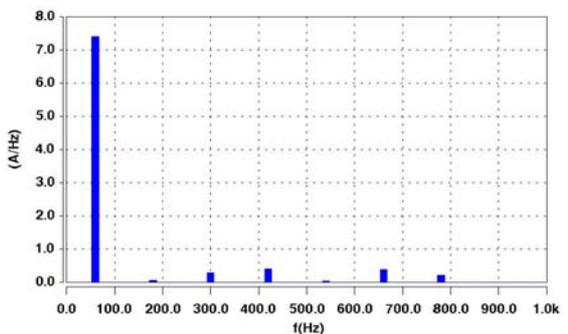
Linha B - alimentador - experimental



Linha B - alimentador - computacional



Linha C - alimentador - experimental

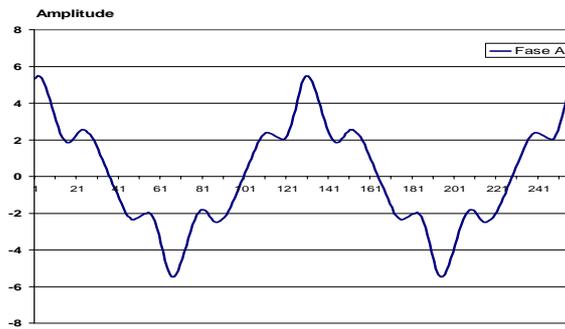


Linha C - alimentador - computacional

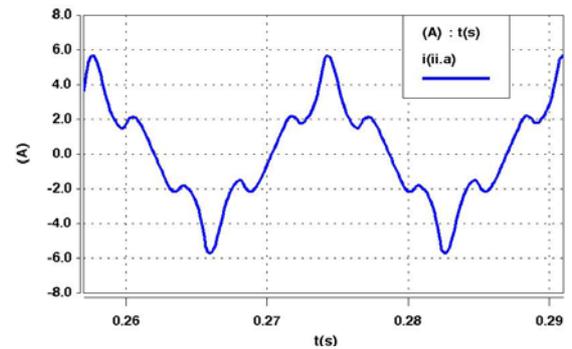
Figura 4.22 - Espectros harmônicos das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência positiva e negativa

(c) Corrente de linha no filtro de seqüência positiva e negativa

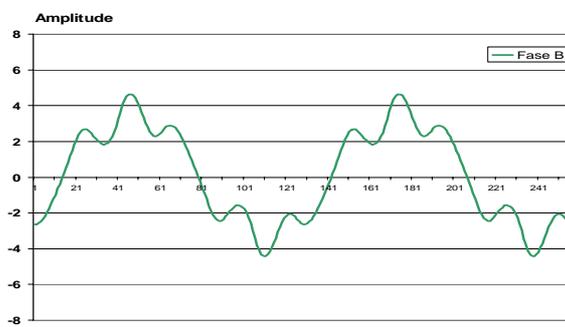
Por fim, a figura 4.23 é indicativa das correntes de linha A, B e C no filtro eletromagnético. Objetivando, mais uma vez, o estabelecimento de termos comparativos, ambos os resultados, experimental e computacional, são evidenciados.



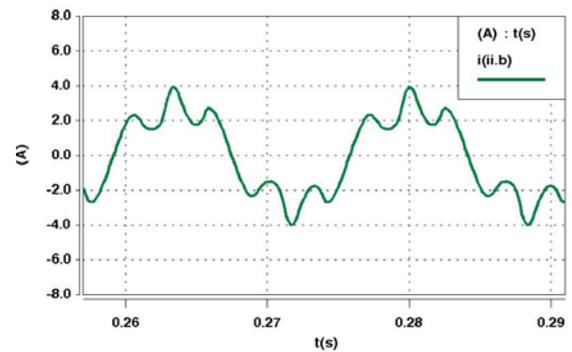
Linha A - filtro - experimental



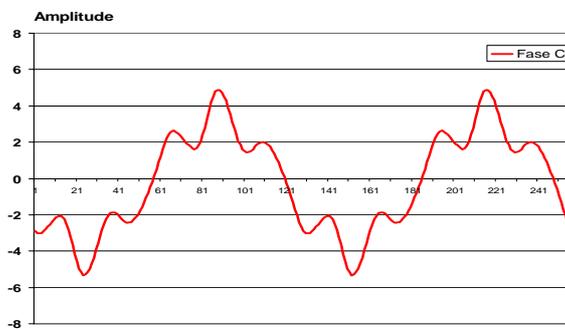
Linha A - filtro - computacional



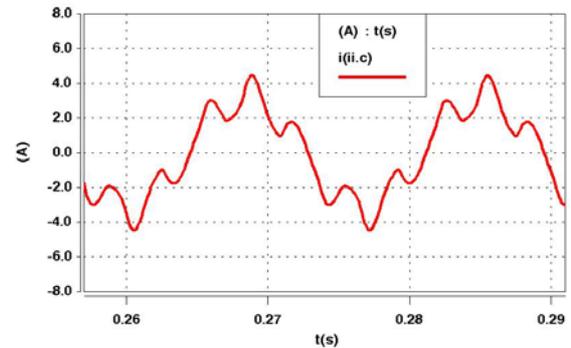
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



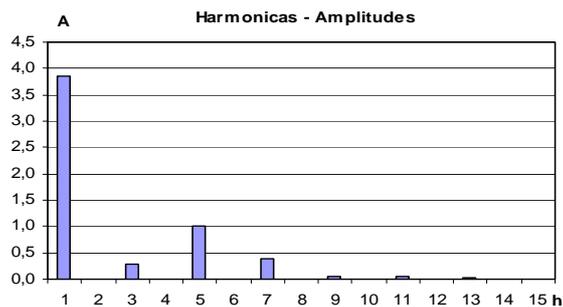
Linha C - filtro - experimental



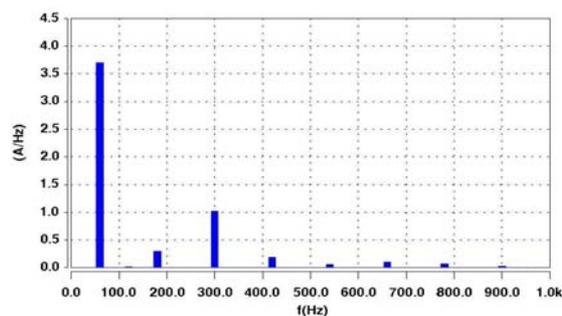
Linha C - filtro - computacional

Figura 4.23 - Formas de onda das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência positiva e negativa

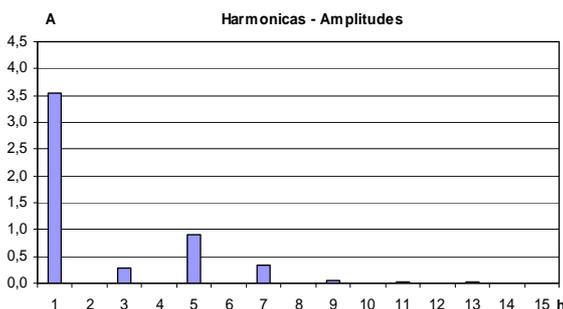
Ainda, a figura 4.24 indica os correspondentes espectros harmônicos para as correntes de pico.



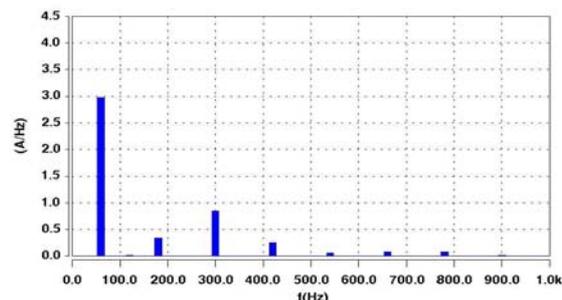
Linha A - filtro - experimental



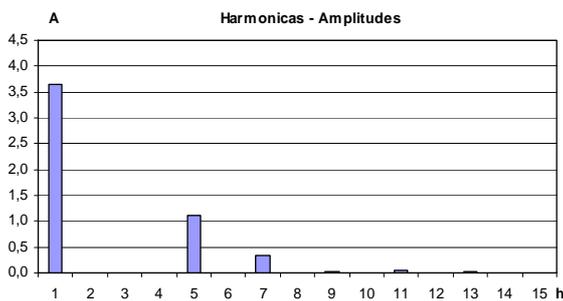
Linha A - filtro - computacional



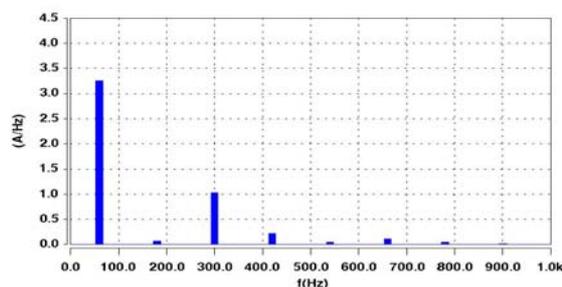
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



Linha C - filtro - experimental

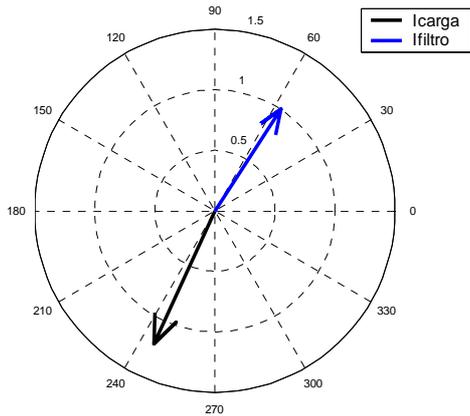


Linha C - filtro - computacional

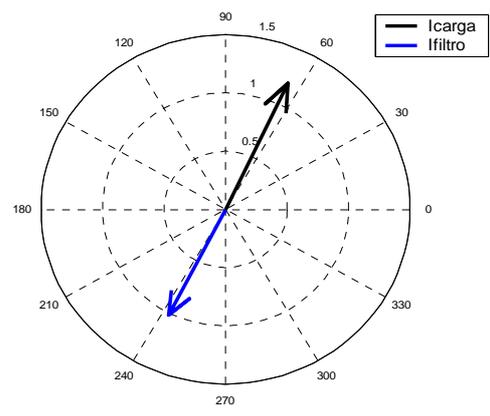
Figura 4.24 - Espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência positiva e negativa

(d) Síntese dos resultados

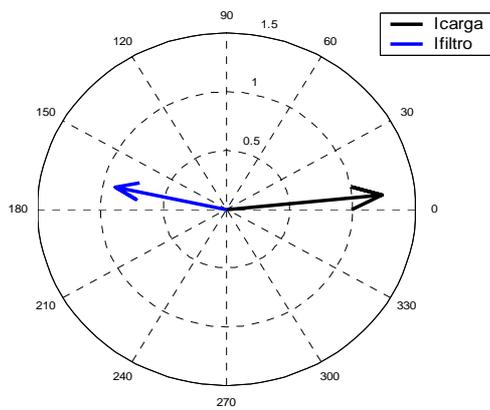
Objetivando fornecer maiores esclarecimentos sobre a operacionalidade do filtro as figuras 4.25 e 4.26 apresentam, na forma de diagramas fasoriais, as correntes harmônicas de pico de 5^a e 7^a ordem, correspondentes ao filtro e à carga não-linear, para as três fases monitoradas. As análises compreendem os resultados computacionais e experimentais.



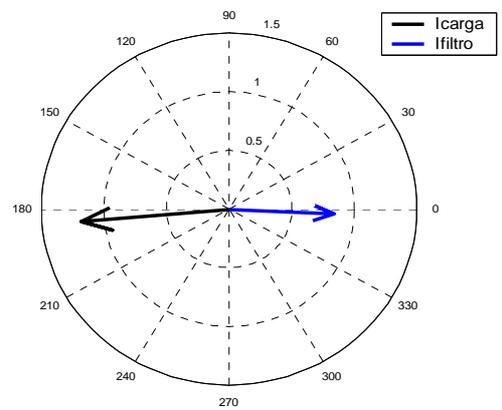
Linha A - experimental - 5ª ordem



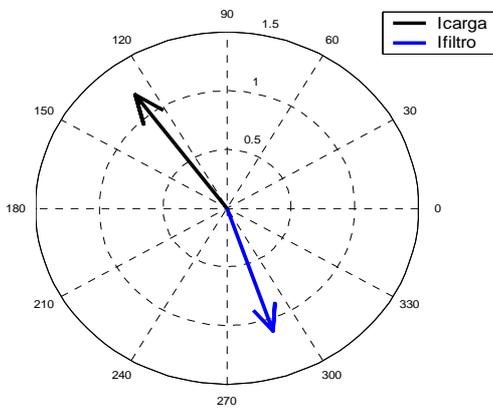
Linha A - computacional - 5ª ordem



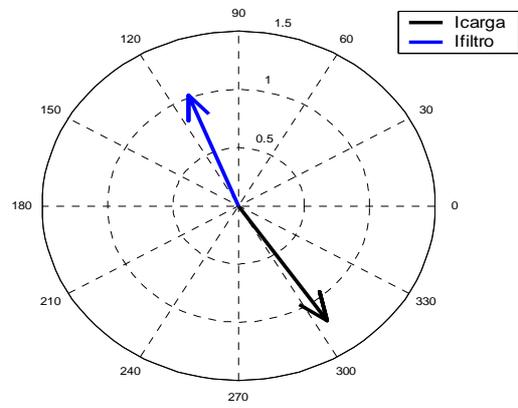
Linha B - experimental - 5ª ordem



Linha B - computacional - 5ª ordem



Linha C - experimental - 5ª ordem

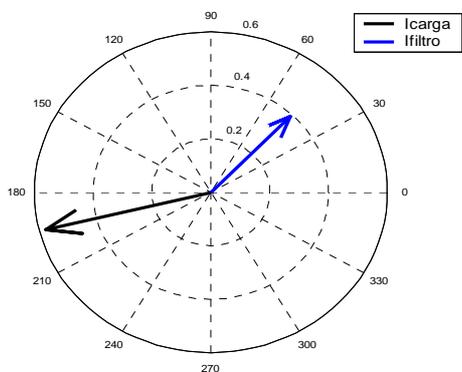


Linha C - computacional - 5ª ordem

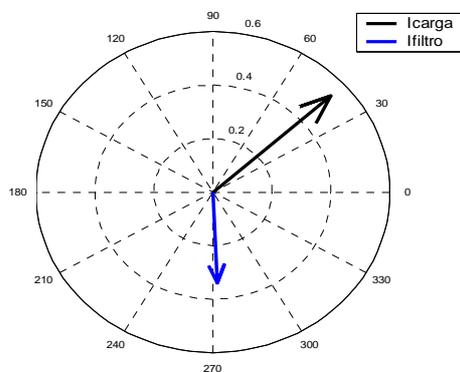
Figura 4.25 - Diagramas fasoriais das correntes de linha na carga e no filtro - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - 5ª ordem - filtro de seqüência positiva e negativa

É importante observar que as referências para os fasores das correntes de carga e do filtro, obtidos de forma computacional e experimental, não são iguais. Não obstante a este fato, a compensação das ordens harmônicas fica clara quando se observam as magnitudes e as

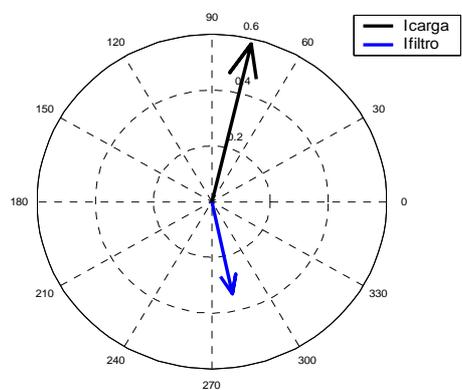
diferenças entre os fasores apresentados para um mesmo procedimento (experimental ou computacional).



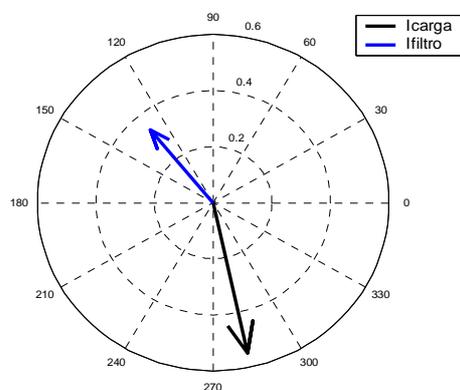
Linha A - experimental - 7ª ordem



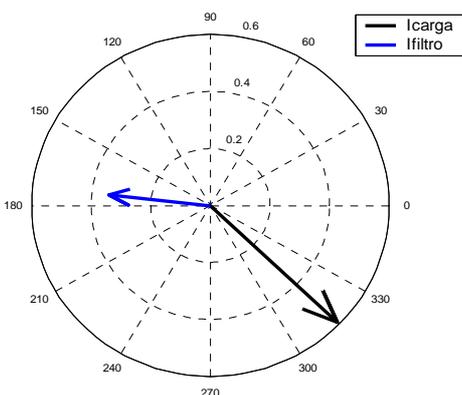
Linha A - computacional - 7ª ordem



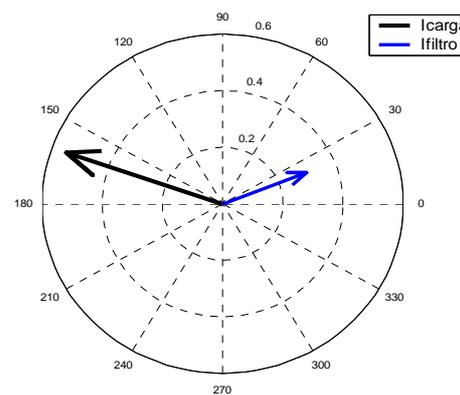
Linha B - experimental - 7ª ordem



Linha B - computacional - 7ª ordem



Linha C - experimental - 7ª ordem



Linha C - computacional - 7ª ordem

Figura 4.26 - Diagramas fasoriais das correntes de linha na carga e no filtro - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - 7ª ordem - filtro de seqüência positiva e negativa

4.3.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

A tabela 4.8 resume os principais resultados anteriores e permite constatar a eficácia do dispositivo e a validação da modelagem do filtro de seqüência positiva e negativa.

Tabela 4.8 - Síntese comparativa dos resultados da operação do filtro eletromagnético de seqüência positiva e negativa sob condições ideais de suprimento

Local	Grandeza		Simulação			Experimental			Diferença (%)		
			A	B	C	A	B	C	A	B	C
Corrente na carga não-linear	Valor eficaz (A)		3,89	3,9	3,89	3,89	4,01	3,9	0	2,7	0,2
	Harmônicas mais significativas pico (A)	5 ^a	1,2	1,19	1,2	1,22	1,24	1,21	1,6	4,0	0,8
		7 ^a	0,54	0,55	0,55	0,58	0,61	0,59	6,9	9,8	6,7
	DIHT (%)		26,6	26,5	26,6	28,9	28,9	28,9	7,9	8,3	7,9
Corrente no alimentador	Valor eficaz (A)		5,22	4,79	5,26	5,26	5,03	5,24	0,7	4,7	0,4
	Harmônicas mais significativas pico (A)	3 ^a	0,32	0,28	0,05	0,3	0,26	0,04	6,6	7,7	25
		5 ^a	0,18	0,37	0,29	0,2	0,37	0,29	10	0	0
		7 ^a	0,4	0,3	0,4	0,36	0,32	0,4	11,1	6,6	0
DIHT (%)		10,4	11,3	10,6	11,3	12,8	11,6	7,9	2,6	8,6	
Corrente no filtro de seqüência positiva e negativa	Valor Eficaz (A)		2,75	2,42	2,52	2,8	2,6	2,7	1,8	6,9	6,6
	Harmônicas mais significativas pico (A)	3 ^a	0,3	0,32	0,03	0,28	0,29	0,01	7,1	10,3	-
		5 ^a	1,02	0,84	1,03	1,0	0,9	1,11	1,9	6,6	7,2
		7 ^a	0,34	0,34	0,3	0,37	0,34	0,34	8,1	0	11,7
DIHT (%)		30,5	31,3	32,7	29,2	29,7	32,1	4,4	5,4	1,8	

Observando os resultados da tabela 4.8, pode-se constatar que:

- As correntes harmônicas injetadas pela carga não-linear se apresentam com conteúdos harmônicos responsáveis por distorções totais em torno de 28%;
- Quando da inserção do filtro de seqüência positiva e negativa, a nova distorção total da corrente de linha, do lado do supridor, passou para um valor nas imediações de 10%. Tal redução, bastante significativa, tem sustentação na forte eliminação da componente harmônica de ordem 5 e parte da componente de ordem 7. Disto desprende que ocorreu uma redução da distorção harmônica total de cerca de 65%;
- No que tange às correntes encontradas nas linhas do filtro, constatou-se, como seria esperado, que o dispositivo, operando de forma saturada e com neutro isolado, se apresenta como uma carga não-linear com geração de harmônicas de seqüência positiva e negativa, sendo a 5ª e 7ª ordens as que se manifestam com maiores amplitudes. O aparecimento da 3ª ordem se justifica pela geometria planar do reator, como já mencionado anteriormente;
- Os resultados computacionais e experimentais, de um modo geral, evidenciaram uma boa correlação. Isto ocorreu tanto para as formas de onda quanto para os valores obtidos. Desta forma, fica esclarecido que o processo de validação da modelagem computacional apresentou um bom desempenho no sentido de representar a operação do dispositivo focado nesta fase da pesquisa, qual seja, o filtro de seqüência positiva e negativa;
- Como observação final, é importante ressaltar que, muito embora se tenha constatado o bom desempenho do filtro de seqüência positiva e negativa, outras influências operacionais não podem ser ignoradas. Dentre elas destaca-se o aumento do valor RMS da corrente de suprimento do conjunto carga e filtro, visto a parcela de corrente fundamental necessária ao funcionamento da unidade eletromagnética. Associada a mesma corrente, há ainda a ser destacado as implicações sobre o fator

de potência do conjunto, o qual sofre redução diante do aumento da parcela indutiva da corrente total. Com o aumento da corrente fundamental e sua influência sobre os cálculos dos DIHT, vale também observar que, somado ao efetivo processo de atenuação das componentes harmônicas, isto também contribui para uma redução maior dos níveis de distorção.

Deve-se ressaltar que, embora os resultados computacionais e experimentais apresentem boa concordância, é de se esperar, como aconteceram para a metodologia da seção anterior, alguns desvios entre os resultados. Os motivos que justificariam tais discrepâncias já foram considerados anteriormente e não serão aqui repetidos.

4.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo primou pelos seguintes aspectos:

- Caracterização física dos protótipos dos filtros eletromagnéticos de seqüência zero e de seqüência positiva e negativa, construídos para fins deste trabalho e respectivas obtenções dos dados necessários ao suprimento das informações para os modelos computacionais elaborados;
- Definição dos arranjos laboratoriais utilizados tanto para os estudos computacionais como os experimentais, voltados para o processo de validação das modelagens dos filtros eletromagnéticos sob enfoque;
- Apresentação e discussão dos resultados experimentais e computacionais para as correntes de linha e respectivos espectros harmônicos correspondentes à carga não-linear, à alimentação e aos filtros eletromagnéticos, objetivando o processo de

validação dos modelos e estratégias de compensação de correntes harmônicas aqui propostas;

- Análise da eficácia dos filtros de seqüência zero e de seqüência positiva e negativa quanto aos seus propósitos.

Atendendo aos objetivos supramencionados, o presente capítulo ofereceu as seguintes contribuições:

- Validação do modelo computacional do filtro eletromagnético de seqüência zero, sob condições operacionais consideradas ideais, ou seja: fonte de tensão senoidal equilibrada, carga não-linear equilibrada, parâmetros de rede equilibrados e filtro adequado aos propósitos da compensação (baixa impedância à seqüência zero). Os estudos computacionais comparados aos respectivos resultados laboratoriais constituíram-se na base do processo utilizado;
- Validação do modelo computacional do filtro eletromagnético de seqüência positiva e negativa, sob condições operacionais também consideradas ideais, caracterizadas no item anterior. Os estudos computacionais comparados aos respectivos resultados laboratoriais constituíram-se na base do processo utilizado;
- Ratificação da eficácia das metodologias propostas para o processo de filtragem, fundamentadas em dispositivos eletromagnéticos.

FATORES DE INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO DOS FILTROS ELETROMAGNÉTICOS

5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos capítulos precedentes foram abordados aspectos diversos referentes aos equipamentos em estudo. As análises envolveram desde o princípio de funcionamento dos dispositivos até a validação computacional, através de ensaios laboratoriais. Não obstante o sucesso até então obtido, é relevante ressaltar que as investigações conduzidas contemplaram tão apenas situações ideais de funcionamento. Sob tais condições, devem ser compreendidas: redes de alimentação com tensões senoidais e equilibradas, impedâncias simétricas para todas as partes envolvidas, carga não-linear equilibrada, etc.

Em vista do fato de que as redes elétricas não atendem as premissas anteriores, torna-se imperativo a realização de trabalhos adicionais investigativos voltados para os estudos de desempenho dos produtos focados sob distintas condições que aquelas postuladas. Este assunto constitui-se na essência deste capítulo, o qual realiza estudos comparativos dos filtros, de modo experimental e computacional, quando estes se encontram operando sob condições não-ideais de funcionamento.

Para atender aos objetivos aqui propostos, este capítulo encontra-se estruturado da seguinte forma:

Definição dos casos considerados nas investigações experimentais e computacionais, os quais contemplam os desvios das condições ideais mais comumente encontrados nas redes e equipamentos elétricos;

Apresentação dos resultados obtidos e respectivas comparações com as situações idealizadas;

Caracterização do nível de relevância do tipo de desvio analisado.

5.2 - FATORES DE INFLUÊNCIA NOS PROCESSOS DE FILTRAGEM

Assim, para contemplar os itens anteriormente mencionados, a tabela 5.1 sintetiza as situações selecionadas para os estudos de desempenho dos filtros eletromagnéticos sob distintos desvios das condições ideais. Para cada caso considerado, são caracterizadas as situações e os valores adotados para quantificar os desvios. Estas situações expressam condições operacionais reais, frequentemente encontradas nos sistemas elétricos. Em vista dos impactos que as mencionadas variáveis possam trazer para a operação dos dispositivos, considera-se fundamental avaliar seus efeitos para um correto dimensionamento do filtro eletromagnético.

Vale lembrar que, à exceção dos parâmetros alterados e destacados na tabela 5.1, os demais dados obedecem integralmente àqueles já empregados no capítulo anterior. Por tais motivos, considera-se dispensável repeti-los nesta etapa do trabalho.

Ainda com respeito aos casos identificados para os estudos, apenas o Caso a-4 não possui correspondência experimental. Isto se deve ao fato que o protótipo construído não permite mudanças para a impedância de dispersão do filtro.

Tabela 5.1 - Casos analisados para as situações operacionais não-ideais

Filtro eletro magnético	Caso	Situação	Características	Tipo de estudo
Seqüência zero	a-1	Tensão senoidal desequilibrada ($V_A^-/V_A^+ = 3\%$) e carga não-linear equilibrada (2,7 kVA)	$V_A^0 = 1,35V / 162^\circ$ $V_A^+ = 126,5V / 0^\circ$ $V_A^- = 3,85V / -6,4^\circ$	Computacional / experimental
	a-2	Tensão distorcida equilibrada (DTHT=7,1% e $V_1=127V$) e carga não-linear equilibrada (2,7 kVA)	$V_3^0 = 5\%$, $V_5^- = 4\%$, $V_7^+ = 3\%$	Computacional / experimental
	a-3	Carga não-linear desequilibrada e tensão senoidal equilibrada de 127 V	$S_A=908VA$, $S_B=633VA$, $S_C=441VA$	Computacional / experimental
	a-4	Carga não-linear e tensão equilibradas, com incremento na indutância de dispersão	Incrementado em 15 vezes	Computacional
Seqüência positiva e negativa	b-1	Tensão senoidal desequilibrada ($V_A^-/V_A^+ = 3\%$) e carga não-linear equilibrada (1,4 kVA)	$V_A^0 = 3,61V / -106^\circ$ $V_A^+ = 120V / 0^\circ$ $V_A^- = 3,61V / 106^\circ$	Computacional / experimental
	b-2	Tensão de alimentação equilibrada com valor eficaz inferior ao nominal e carga equilibrada (1,4 kVA)	$V_A=110V / 0^\circ$, $V_B=110V / -120^\circ$, $V_C=110V / 120^\circ$	Computacional / experimental
	b-3	Carga não-linear desequilibrada e tensão senoidal equilibrada de 117 V	$S_A=370VA$, $S_B=470VA$, $S_C=580VA$	Computacional / experimental
	b-4	Exclusão dos resistores defasadores e tensão equilibrada	$R_A=0 \Omega$, $R_B=0 \Omega$, $R_C=0 \Omega$	Computacional / experimental

5.2.1 - RESULTADOS PARA O FILTRO DE SEQÜÊNCIA ZERO

Com o intuito de avaliar o desempenho do filtro de seqüência zero a partir das situações enfocadas na tabela 5.1, o mesmo arranjo físico identificado na figura 4.4, e repetido na forma da figura 5.1, é utilizado para os trabalhos subseqüentes.

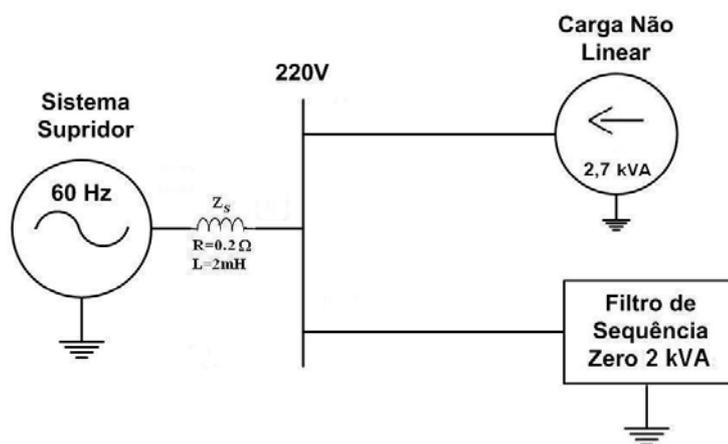


Figura 5.1 - Arranjo físico utilizado para os estudos computacionais e experimentais - filtro de seqüência zero

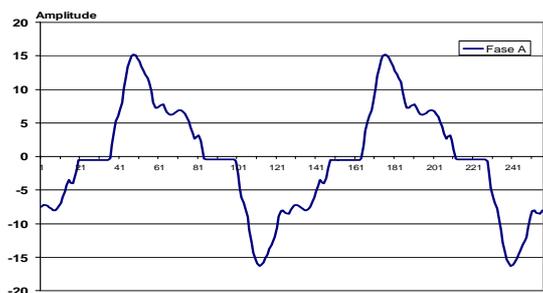
Caso a-1 - Alimentação com tensão desequilibrada

Como forma de analisar o desempenho do filtro diante de tensões desequilibradas, adotou-se uma assimetria responsável por um fator de desequilíbrio de 3% (V_A^-/V_A^+), mantendo-se as demais características idênticas às condições ideais de funcionamento. Vale ainda ressaltar que a tensão utilizada, além da componente de seqüência negativa responsável pelo indicador acima, ainda possui uma componente de seqüência zero (V_A^0) de 1,35V.

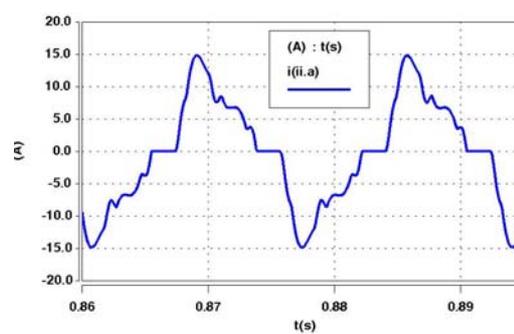
Os resultados a seguir apresentam as correntes de linha na carga não-linear, na alimentação e, por fim, no filtro eletromagnético de seqüência zero.

(a) Corrente na carga não-linear

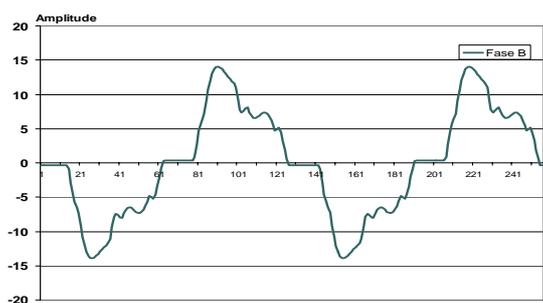
A figura 5.2 apresenta, respectivamente, as correntes nas linhas A, B e C registradas na carga não-linear, de forma experimental e computacional.



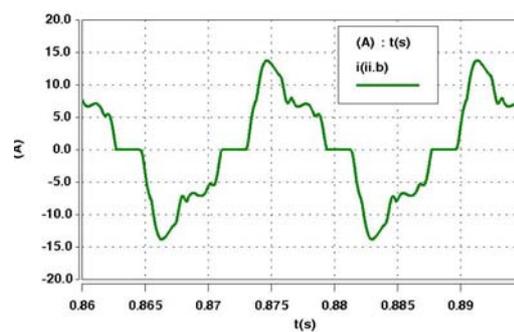
Linha A - carga não-linear - experimental



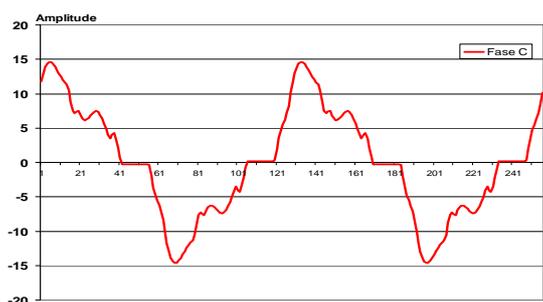
Linha A - carga não-linear - computacional



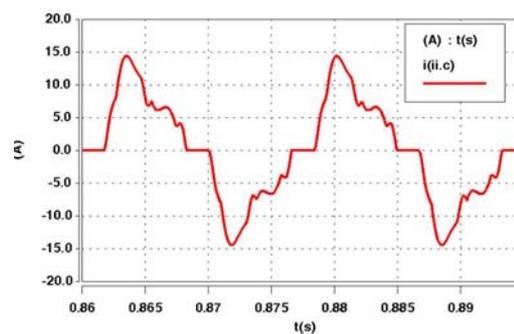
Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional



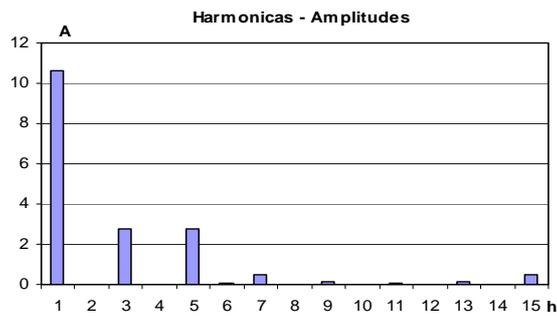
Linha C - carga não-linear - experimental



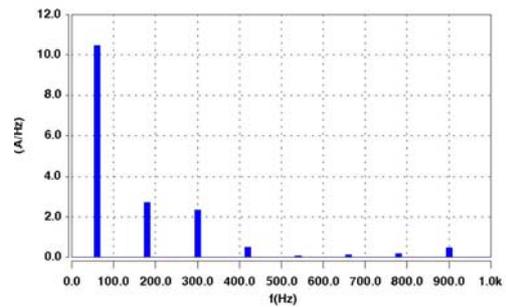
Linha C - carga não-linear - computacional

Figura 5.2 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência zero

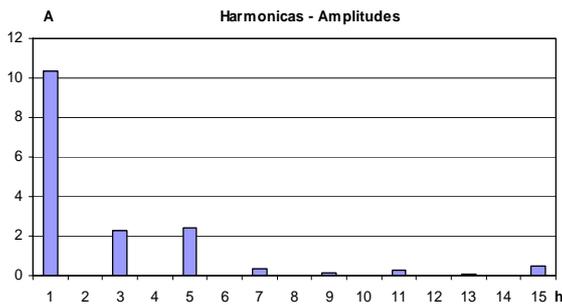
Complementarmente, a figura 5.3 fornece os correspondentes espectros de frequência para as correntes de pico da figura 5.2.



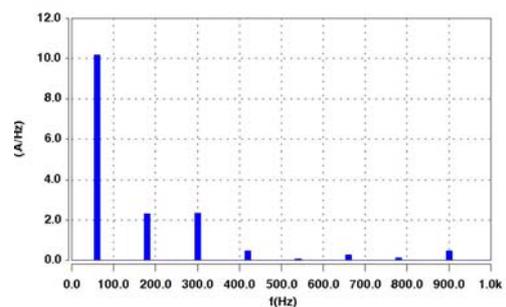
Linha A - carga não-linear - experimental



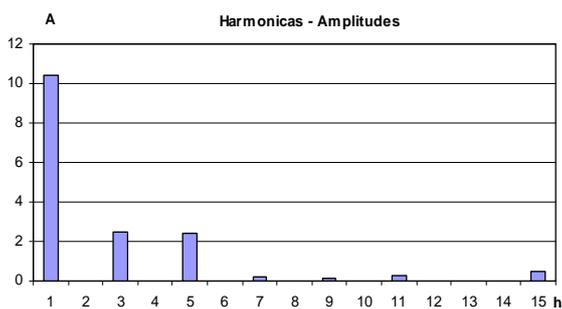
Linha A - carga não-linear - computacional



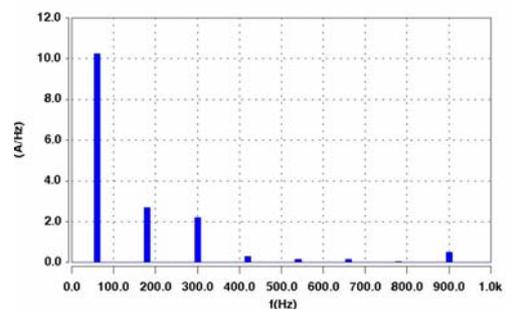
Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional



Linha C - carga não-linear - experimental

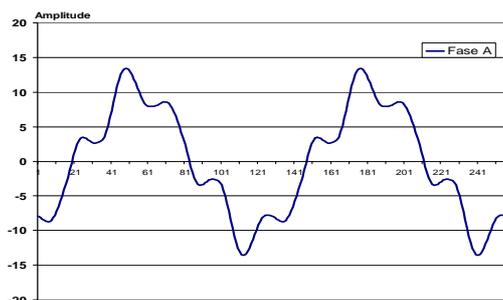


Linha C - carga não-linear - computacional

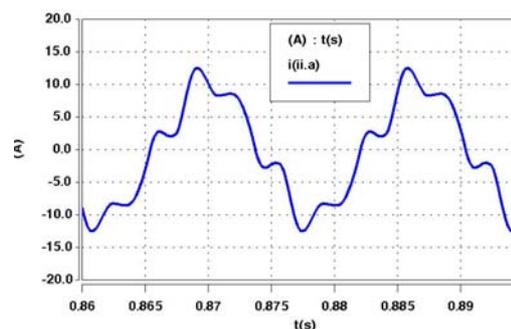
Figura 5.3 - Espectros harmônicos das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência zero

(b) Corrente de linha no alimentador

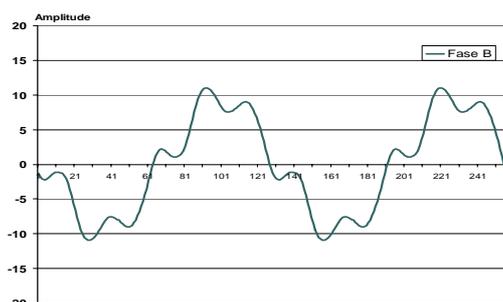
A figura 5.4 apresenta, respectivamente, as correntes nas linhas A, B e C do alimentador, focando os resultados experimental e computacional.



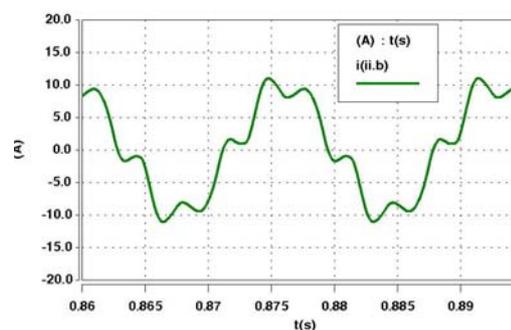
Linha A - alimentador - experimental



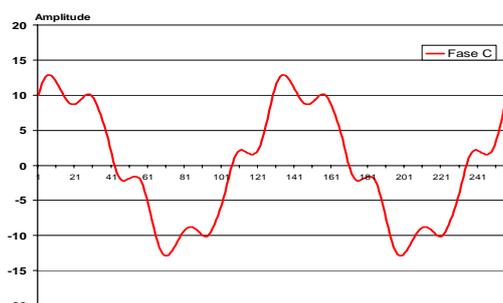
Linha A - alimentador - computacional



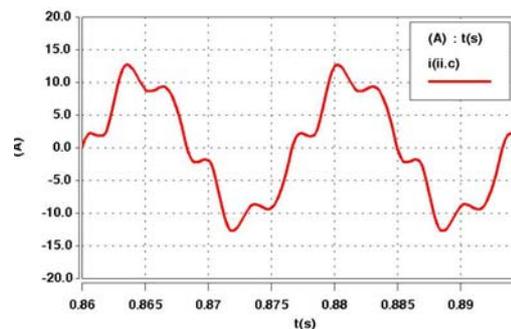
Linha B - alimentador - experimental



Linha B - alimentador - computacional



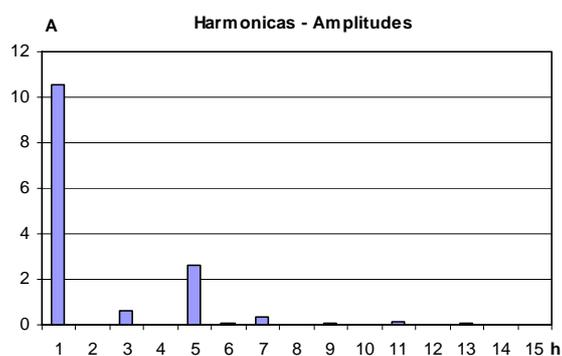
Linha C - alimentador - experimental



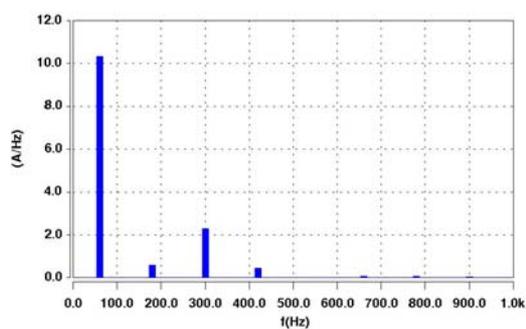
Linha C - alimentador - computacional

Figura 5.4 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência zero

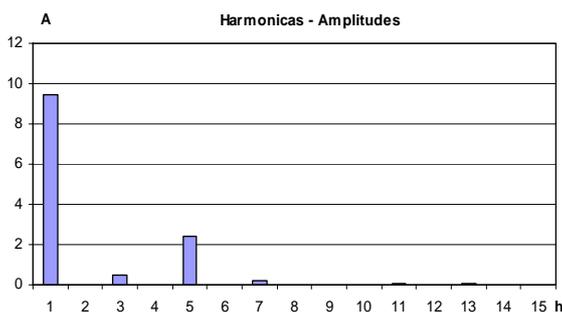
De modo análogo ao caso anterior, a figura 5.5 é indicativa dos espectros harmônicos das correntes de pico na alimentação, obtidos de forma experimental e computacional, respectivamente.



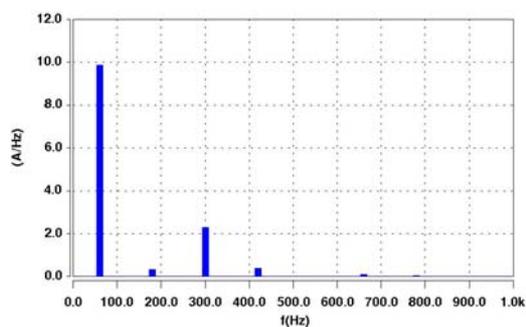
Linha A - alimentador - experimental



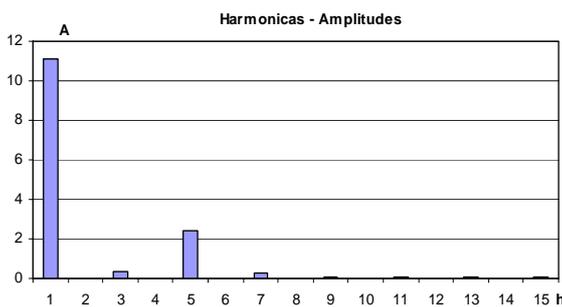
Linha A - alimentador - computacional



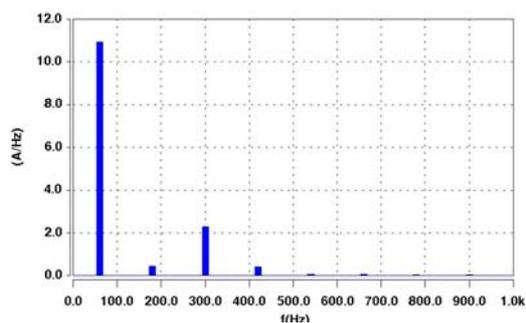
Linha B - alimentador - experimental



Linha B - alimentador - computacional



Linha C - alimentador - experimental

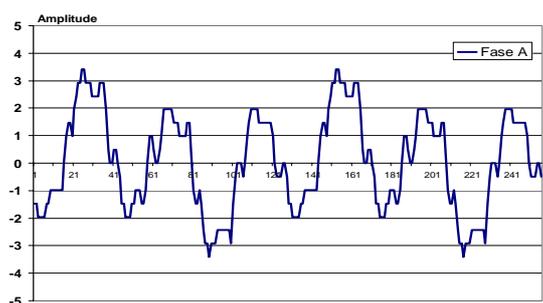


Linha C - alimentador - computacional

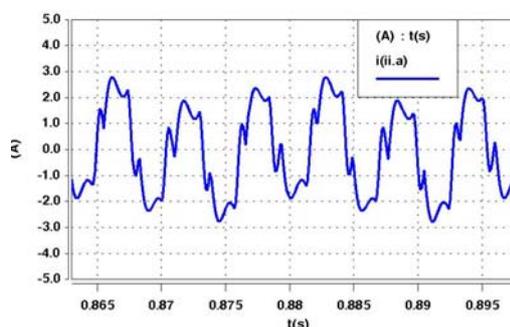
Figura 5.5 - Espectros harmônicos das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência zero

(c) Corrente de linha no filtro de seqüência zero

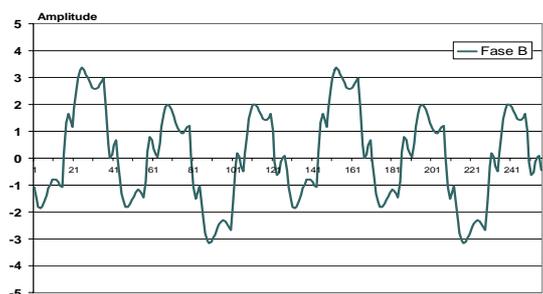
Por fim, a figura 5.6 apresenta, respectivamente, as correntes de linha A, B e C do filtro eletromagnético. Novamente, os resultados experimentais e computacionais são mostrados.



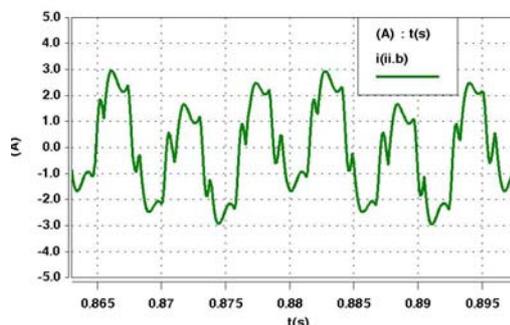
Linha A - filtro - experimental



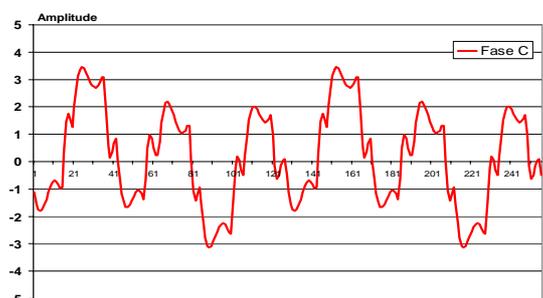
Linha A - filtro - computacional



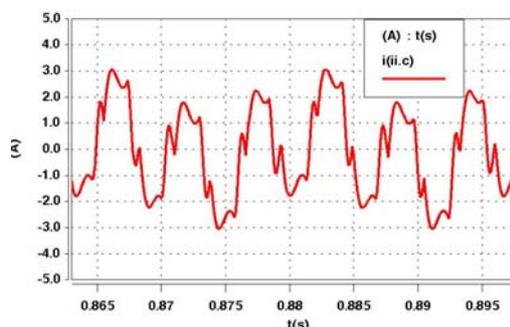
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



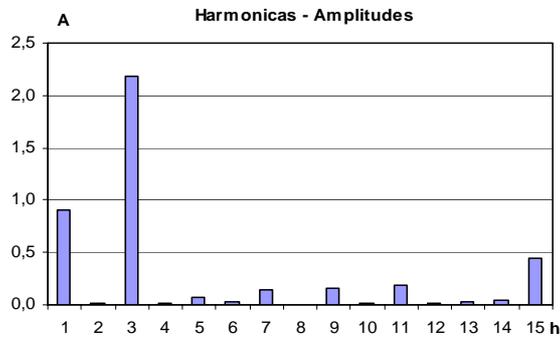
Linha C - filtro - experimental



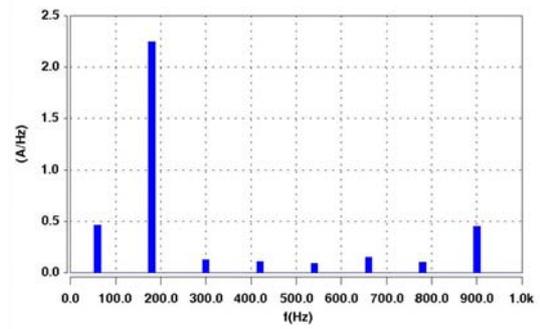
Linha C - filtro - computacional

Figura 5.6 - Formas de onda das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência zero

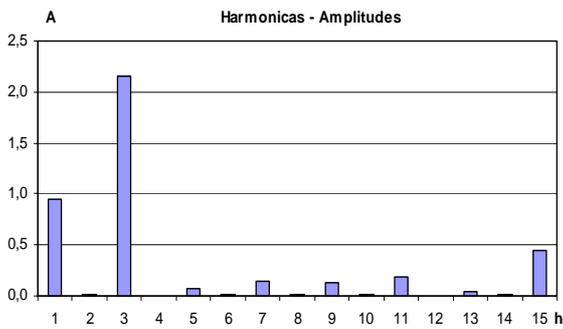
Novamente, a figura 5.7 indica os correspondentes espectros harmônicos para as correntes de pico.



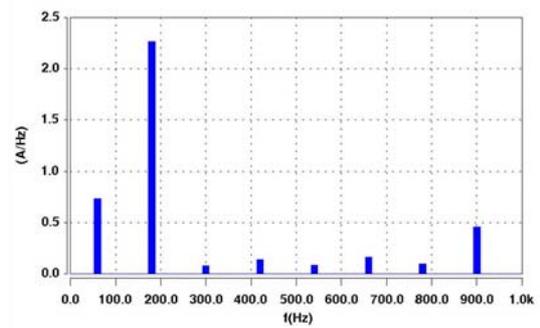
Linha A - filtro - experimental



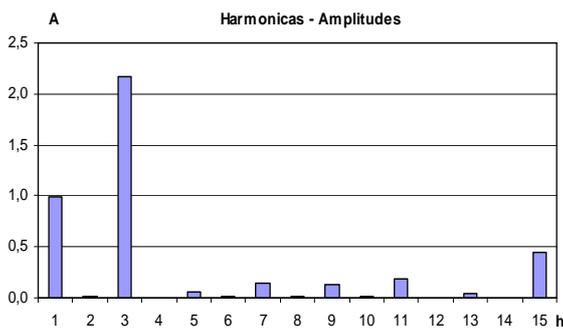
Linha A - filtro - computacional



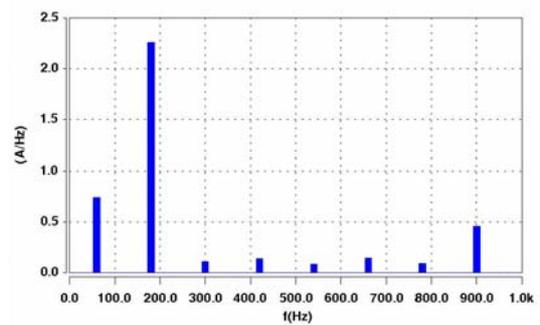
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



Linha C - filtro - experimental

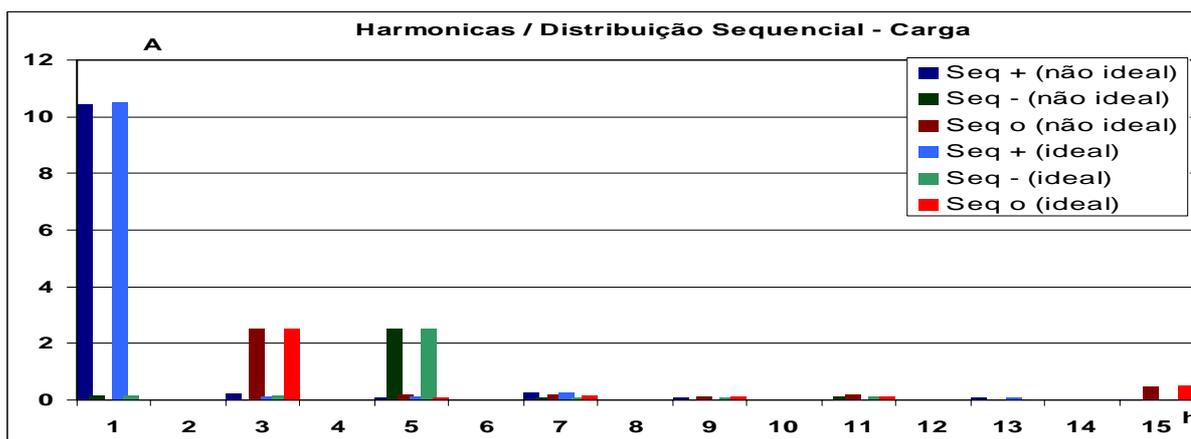


Linha C - filtro - computacional

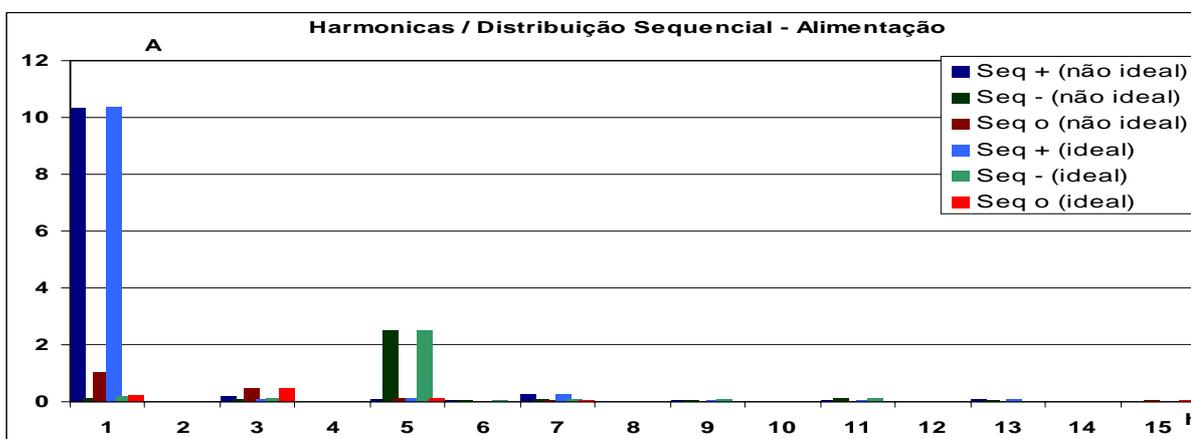
Figura 5.7 - Espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência zero

(d) Síntese das correntes de linha de acordo com as suas seqüências de fase

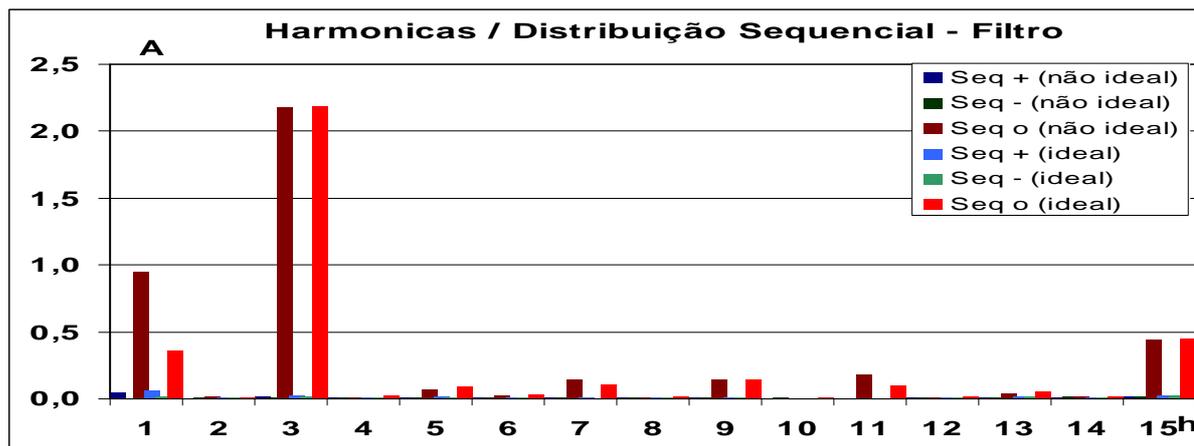
Objetivando comparar o desempenho do filtro de seqüência zero quando com suprimento ideal e sob suprimento desequilibrado, nos termos investigados, a figura 5.8 apresenta os espectros harmônicos com a distribuição de seqüências positivas, negativas e zero das correntes de pico nos mesmos pontos analisados anteriormente, tal como aconteceu para o caso senoidal, mostrado no capítulo anterior.



(a) Seqüência de fases para as correntes na carga - experimental



(b) Seqüência de fases para as correntes no alimentador - experimental



(c) Seqüência de fases para as correntes no filtro - experimental

Figura 5.8 - Distribuição seqüencial para as correntes de linha na carga não-linear, no alimentador e no filtro - senoidal e tensão desequilibrada - filtro de seqüência zero

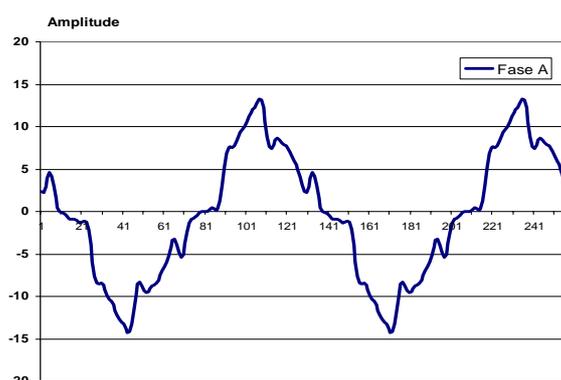
A análise da figura 5.8 enfatiza que o desequilíbrio na tensão de suprimento, como seria esperado, é responsável pela geração de componentes harmônicas de seqüência zero na frequência de 60Hz, que fluem do barramento de suprimento para o filtro. Tomando por base apenas a componente de seqüência zero, esta, somada às componentes harmônicas de seqüência zero advindas da carga não-linear, determinam o aumento do valor da corrente fundamental de seqüência zero absorvida pelo filtro eletromagnético. Este fato determina a necessidade de cuidados especiais quanto ao dimensionamento dos condutores dos enrolamentos do filtro sob análise, que podem aquecer e, conseqüentemente, trazer implicações para o dispositivo, caso esta situação não seja prevista no projeto do equipamento.

Caso a-2 - Alimentação com tensão distorcida

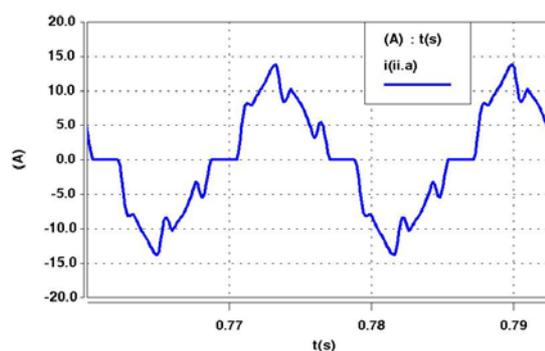
Uma outra condição operacional não-ideal comumente encontrada em sistemas reais está atrelada com um suprimento via um sistema trifásico balanceado, porém distorcido. Para tal fim, como definido anteriormente, adotou-se, a título de ilustração, uma composição tal que a tensão de alimentação contenha: 5% de 3ª harmônica (seqüência zero), 4% de 5ª harmônica (seqüência negativa) e 3% de 7ª harmônica (seqüência positiva).

(a) Corrente na carga não-linear

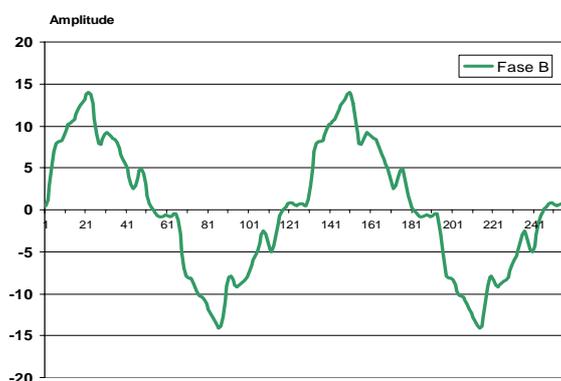
Reportando à carga não-linear, a figura 5.9 apresenta, respectivamente, as correntes de linha A, B e C, de forma experimental e computacional.



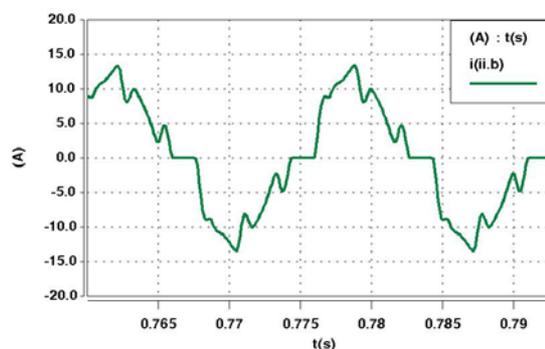
Linha A - carga não-linear - experimental



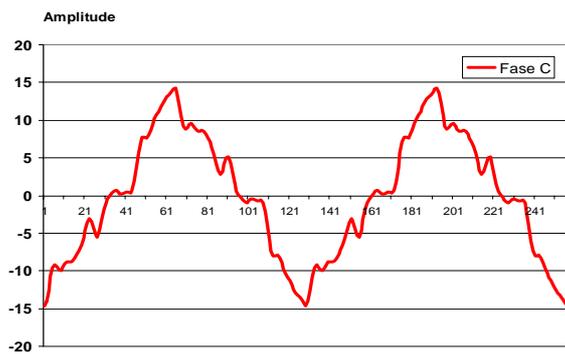
Linha A - carga não-linear - computacional



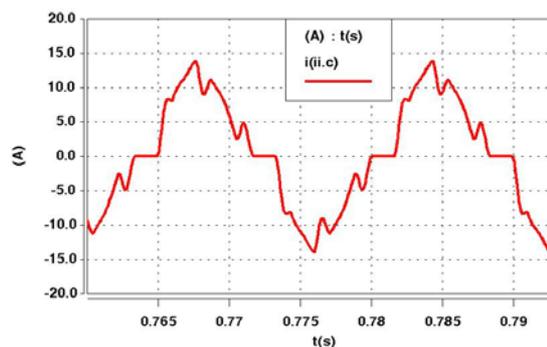
Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional



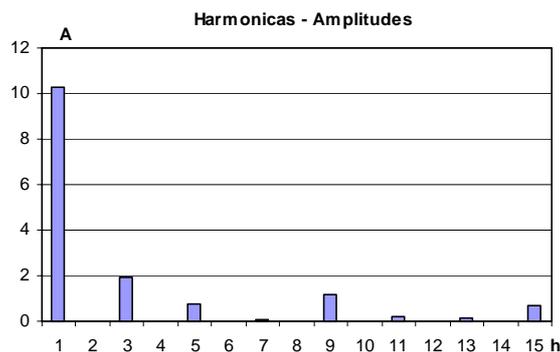
Linha C - carga não-linear - experimental



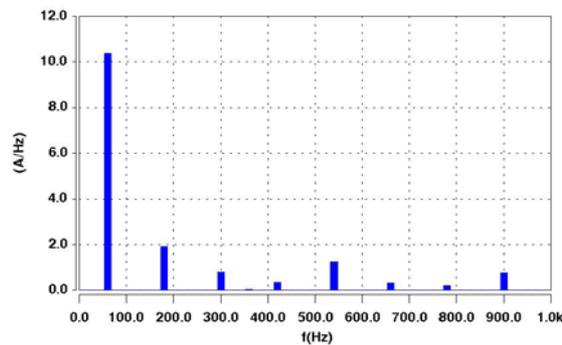
Linha C - carga não-linear - computacional

Figura 5.9 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - tensão distorcida - filtro de seqüência zero

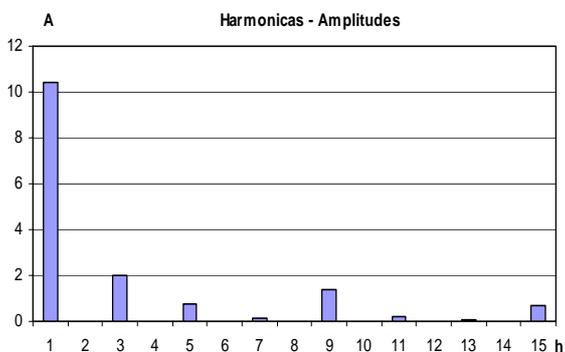
Complementarmente, a figura 5.10 fornece os correspondentes espectros de frequência para as correntes de pico anteriores.



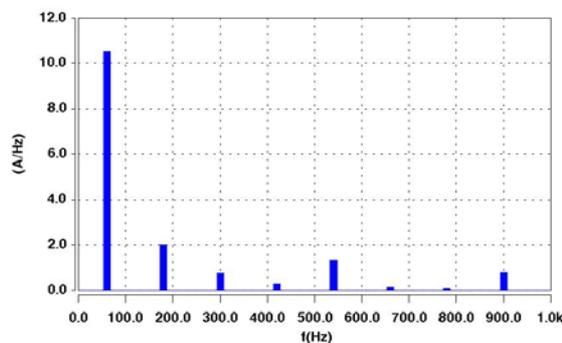
Linha A - carga não-linear - experimental



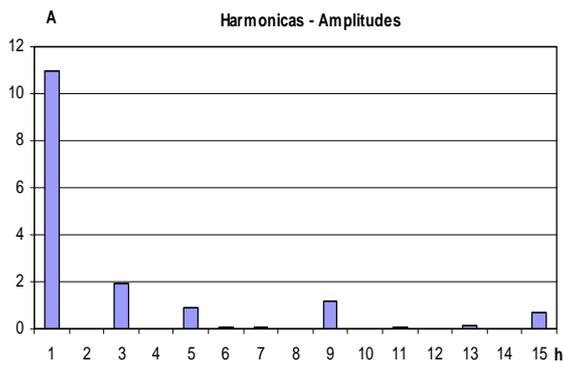
Linha A - carga não-linear - computacional



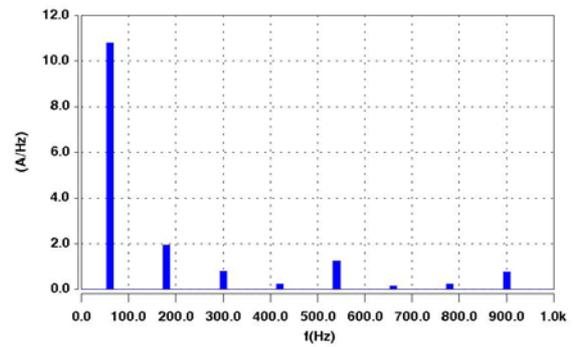
Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional



Linha C - carga não-linear - experimental

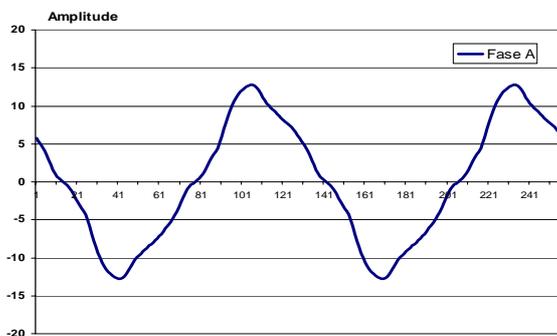


Linha C - carga não-linear - computacional

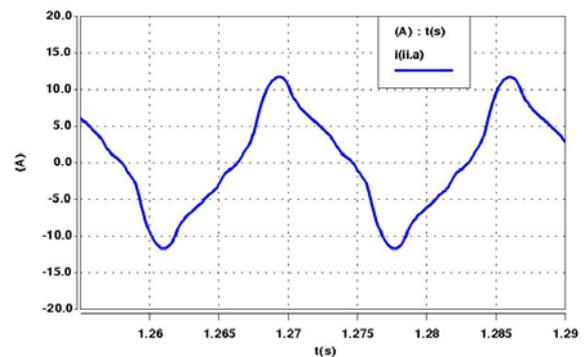
Figura 5.10 - Espectros harmônicos das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - tensão distorcida - filtro de seqüência zero

(b) Corrente de linha no alimentador

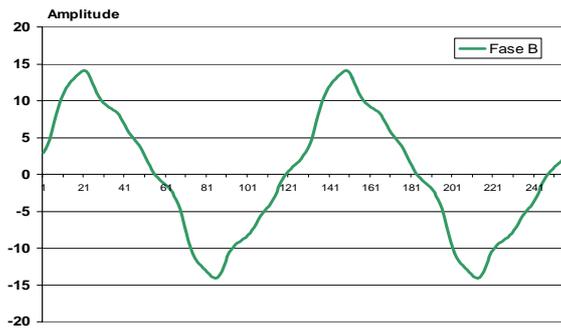
A figura 5.11 apresenta, respectivamente, as correntes nas linhas A, B e C do alimentador, contemplando os resultados experimentais e computacionais.



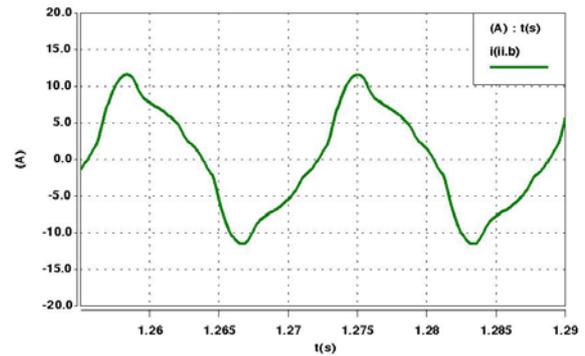
Linha A - alimentador - experimental



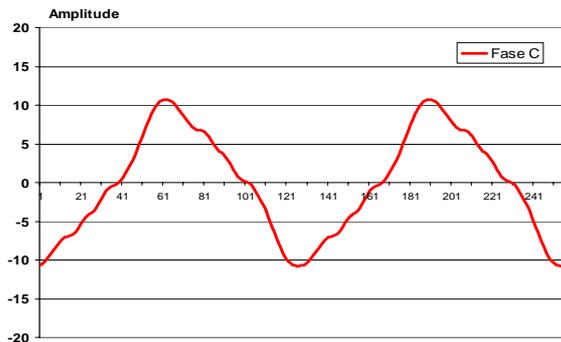
Linha A - alimentador - computacional



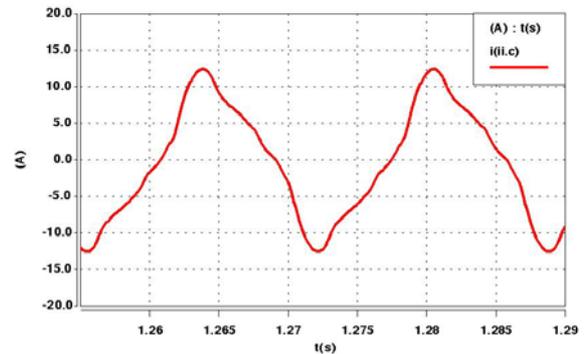
Linha B - alimentador - experimental



Linha B - alimentador - computacional



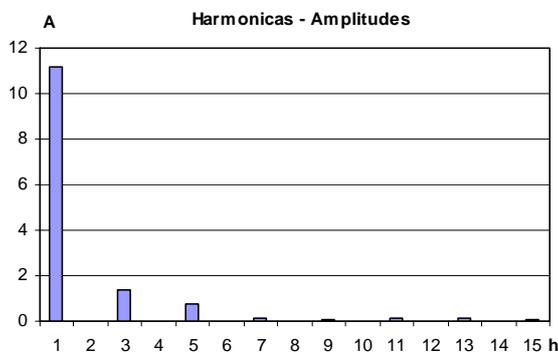
Linha C - alimentador - experimental



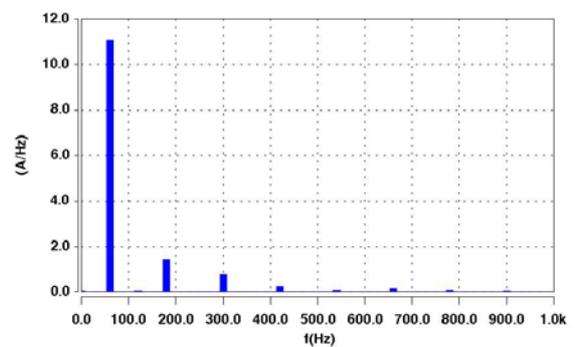
Linha C - alimentador - computacional

Figura 5.11 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - tensão distorcida - filtro de seqüência zero

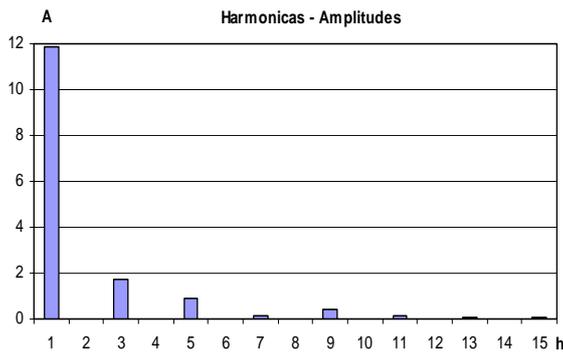
De modo análogo ao caso anterior, a figura 5.12 é indicativa dos espectros harmônicos das correntes de pico registradas na alimentação, obtidos de forma experimental e computacional, respectivamente.



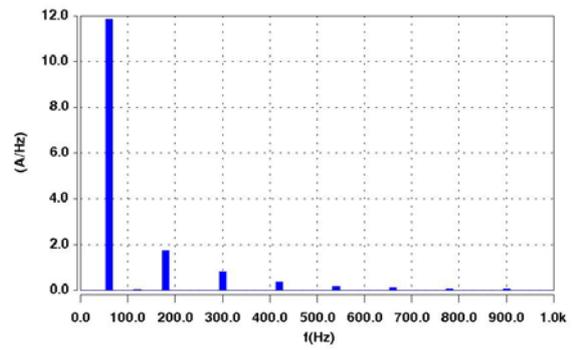
Linha A - alimentador - experimental



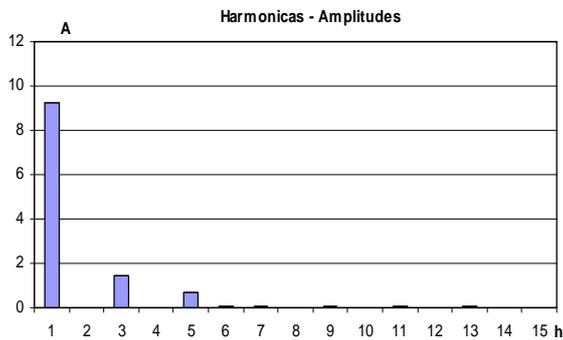
Linha A - alimentador - computacional



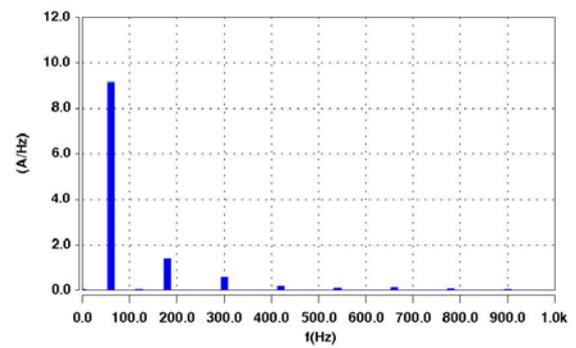
Linha B - alimentador - experimental



Linha B - alimentador - computacional



Linha C - alimentador - experimental

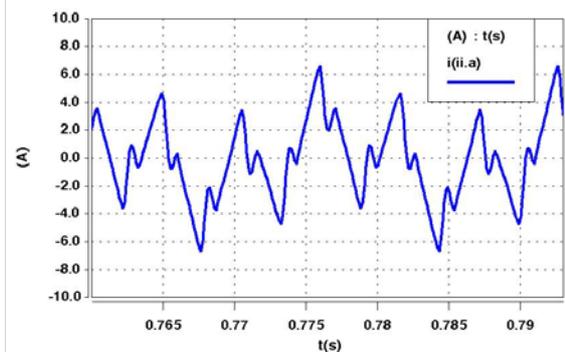
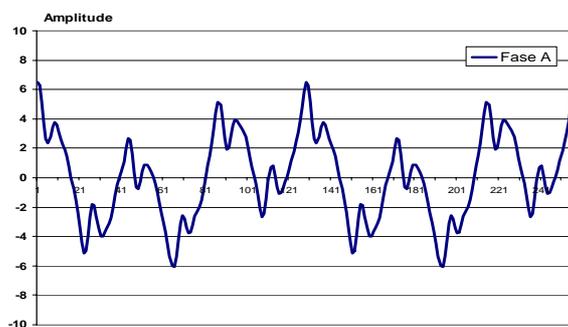


Linha C - alimentador - computacional

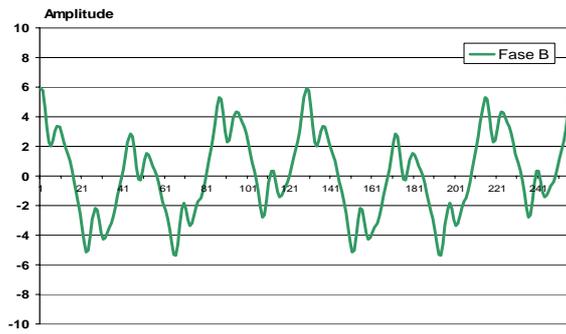
Figura 5.12 - Espectros harmônicos das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - tensão distorcida - filtro de seqüência zero

(c) Corrente de linha no filtro de seqüência zero

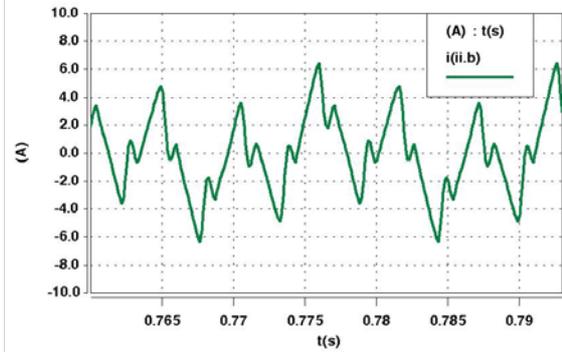
Por fim, a figura 5.13 apresenta, respectivamente, as correntes de linha A, B e C do filtro eletromagnético, novamente, de forma experimental e computacional.



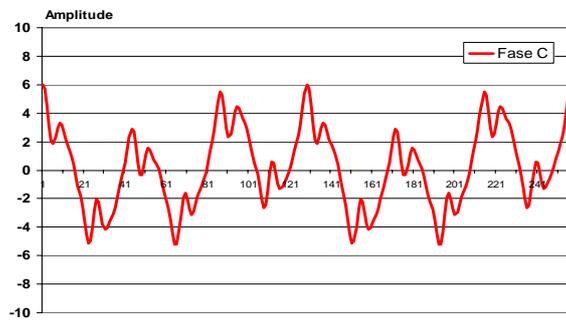
Linha A - filtro - experimental



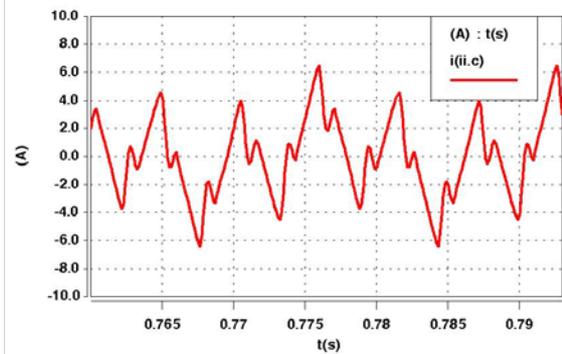
Linha A - filtro - computacional



Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional

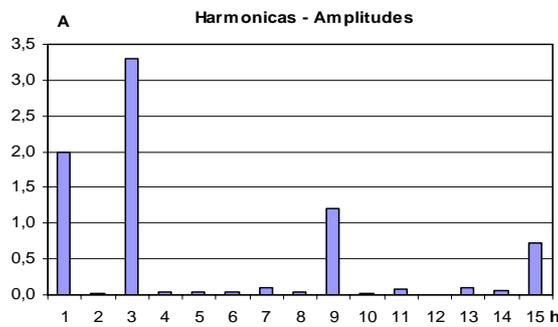


Linha C - filtro - experimental

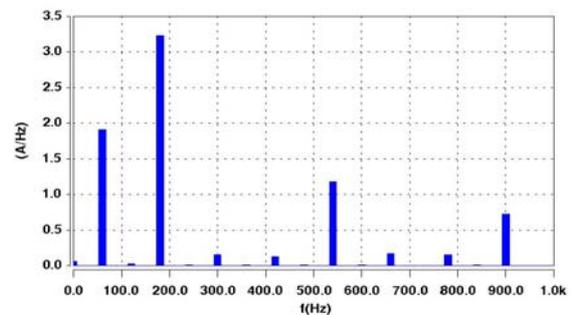
Linha C - filtro - computacional

Figura 5.13 - Formas de onda das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - tensão distorcida - filtro de seqüência zero

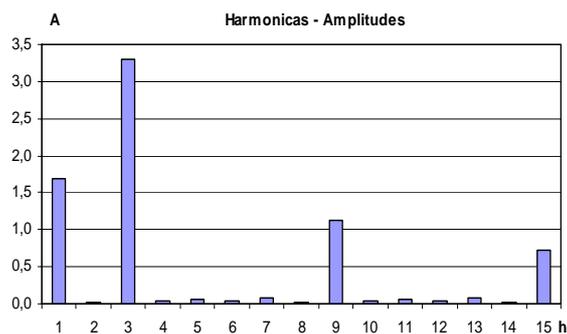
A figura 5.14 indica os correspondentes espectros harmônicos para as correntes de pico.



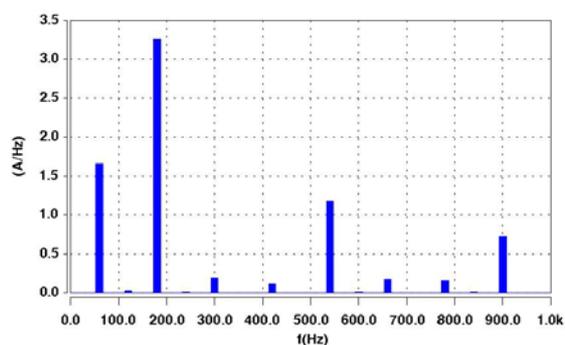
Linha A - filtro - experimental



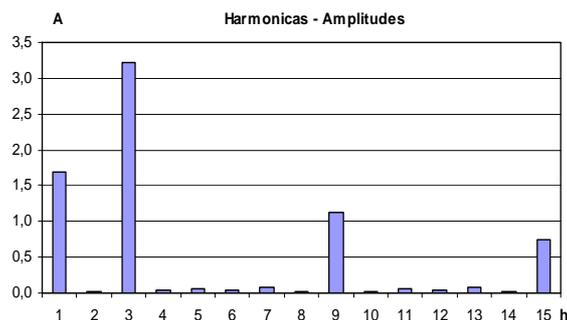
Linha A - filtro - computacional



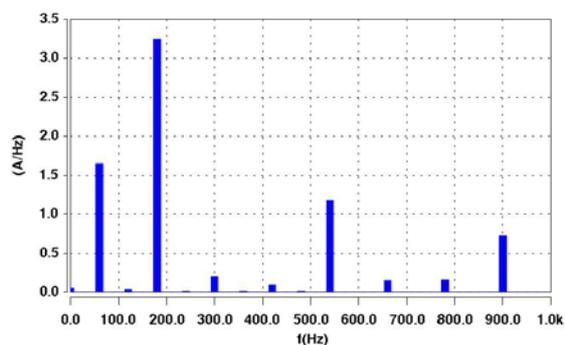
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



Linha C - filtro - experimental



Linha C - filtro - computacional

Figura 5.14 - Espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - tensão distorcida - filtro de seqüência zero

As diferenças encontradas entre os espectros harmônicos das correntes do filtro experimental e computacionalmente podem ser atribuídas, dentre outros aspectos, às imperfeições frequentemente detectadas nos ensaios laboratoriais. De fato, muito embora os esforços para a reprodução de situações impostas, pequenos desvios são inerentes ao processo de geração das ondas de tensão, justificando assim os erros detectados entre os resultados experimentais e computacionais.

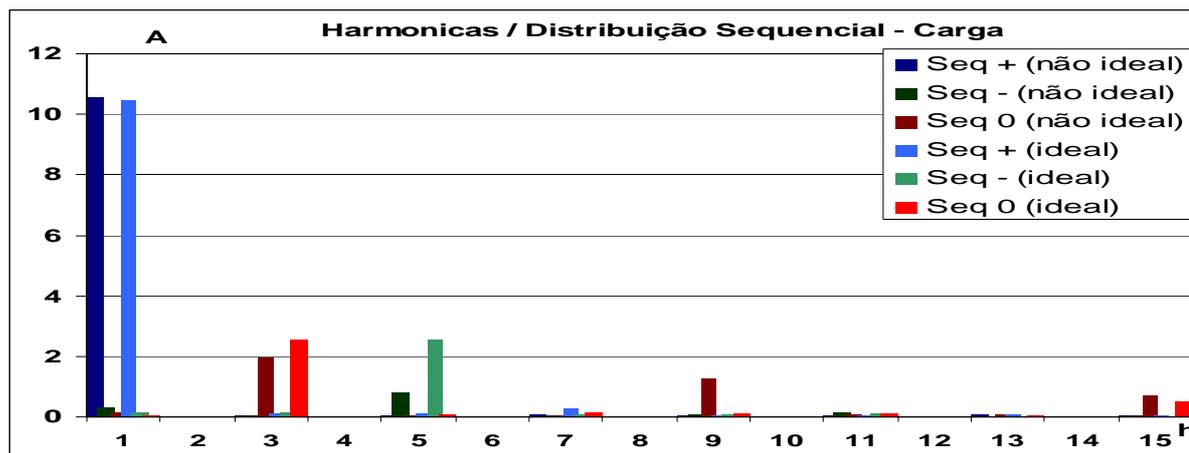
(d) Síntese das correntes de linha de acordo com as suas seqüências de fase

Mais uma vez, objetivando comparar o desempenho do filtro de seqüência zero quando do suprimento ideal e diante do suprimento distorcido aqui enfocado, a figura 5.15 apresenta os espectros harmônicos com a distribuição de seqüências positivas, negativas e zero para as correntes de pico nos mesmos pontos analisados anteriormente. Apenas os resultados experimentais são considerados e as cores destacam a seqüência de fases da componente harmônica sob foco.

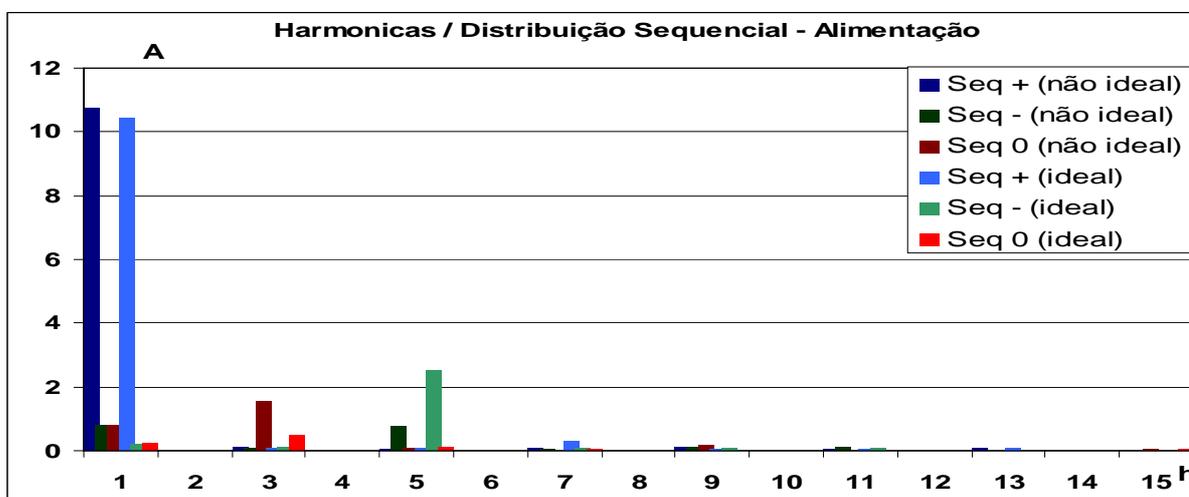
Os resultados para este caso evidenciam que a aplicação de uma tensão distorcida provoca alterações nas correntes de linha da carga, para a freqüência fundamental e para cada ordem harmônica. Este fato, tal como aconteceu para o caso anterior, determina a necessidade de cuidados especiais quanto ao dimensionamento dos condutores dos enrolamentos do filtro sob análise, que podem aquecer e, conseqüentemente, trazer restrições para a utilização do dispositivo, caso esta situação não seja prevista no projeto do equipamento.

Caso a-3 - Carga não-linear desequilibrada

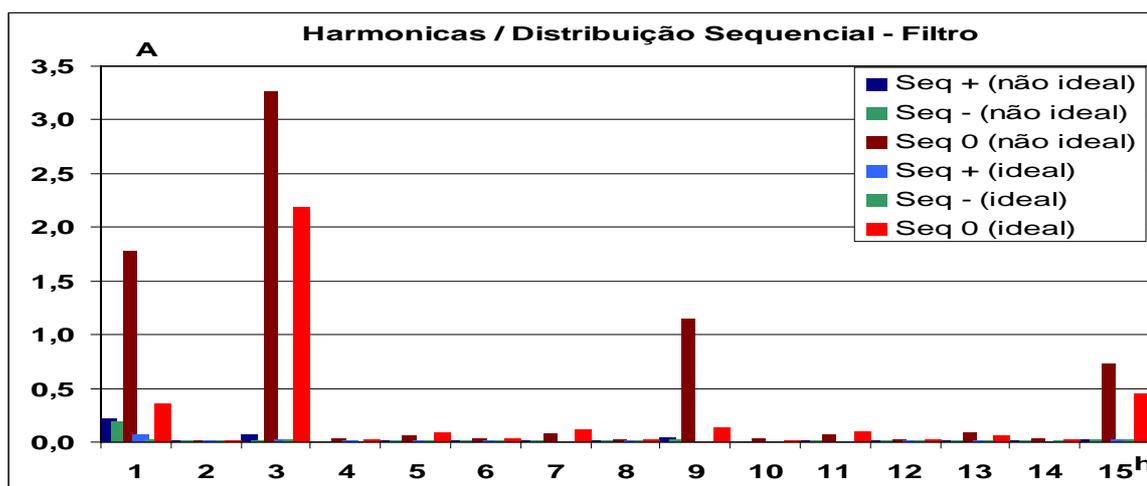
De modo a contemplar esta situação não-ideal, adotou-se uma nova composição para a carga, a qual passa a ser constituída por 3 unidades retificadoras distintas, cujas potências são: $S_A=908\text{VA}$, $S_B=633\text{VA}$ e $S_C=441\text{VA}$. Quanto às demais grandezas, estas voltam a ser as mesmas empregadas para as condições ideais de funcionamento do filtro.



(a) Seqüência de fases para as correntes de linha na carga - experimental



(b) Seqüência de fases para as correntes de linha no alimentador - experimental



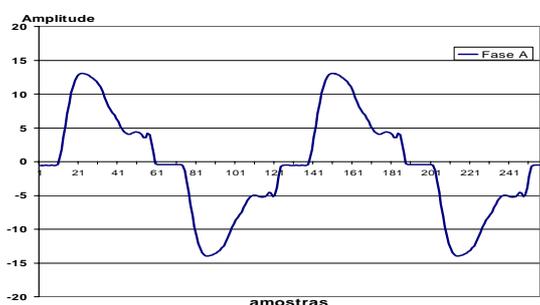
(c) Seqüência de fases para as correntes de linha no filtro - experimental

Figura 5.15 - Distribuição seqüencial para as correntes de linha na carga não-linear, no alimentador e no filtro - senoidal e tensão distorcida - filtro de seqüência zero

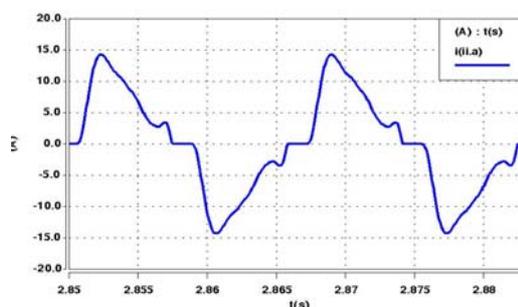
As figuras 5.16-5.22 apresentam os resultados para as correntes de linha registradas na carga não-linear, na alimentação e, por fim, no filtro de seqüência zero. Como para os demais casos, ambos os desempenhos, experimental e computacional, são destacados.

(a) Corrente na carga não-linear

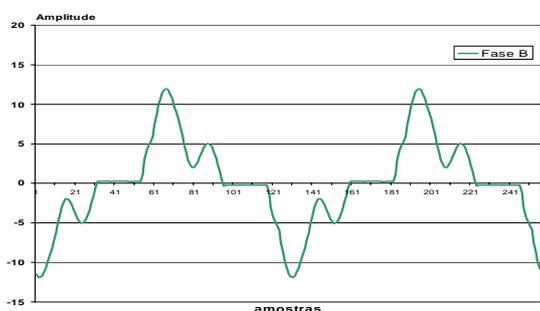
A figura 5.16 apresenta, respectivamente, as correntes de linha A, B e C obtidas na carga não-linear.



Linha A - carga não-linear - experimental



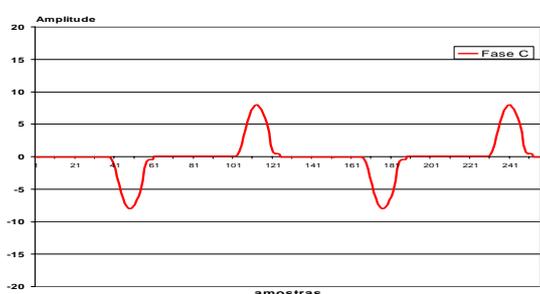
Linha A - carga não-linear - computacional



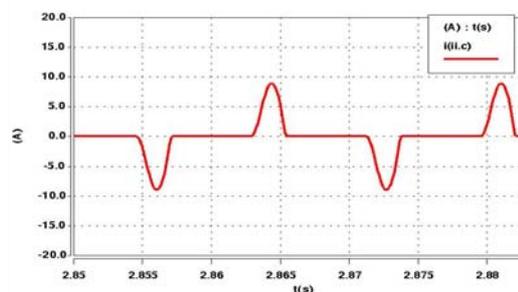
Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional



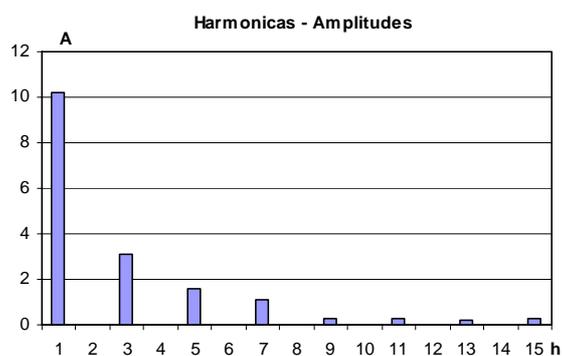
Linha C - carga não-linear - experimental



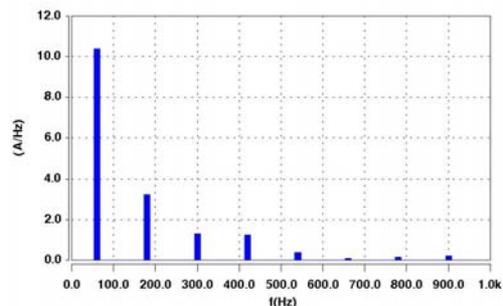
Linha C - carga não-linear - computacional

Figura 5.16 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência zero

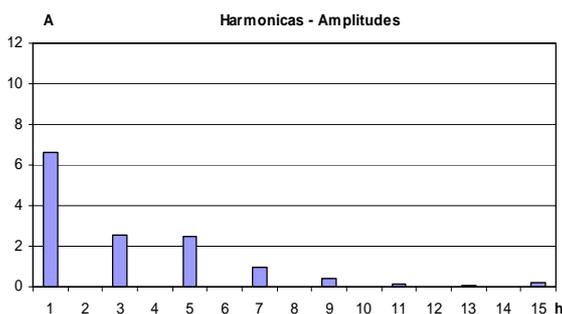
Complementarmente, a figura 5.17 fornece os correspondentes espectros de frequência para as correntes anteriores de pico.



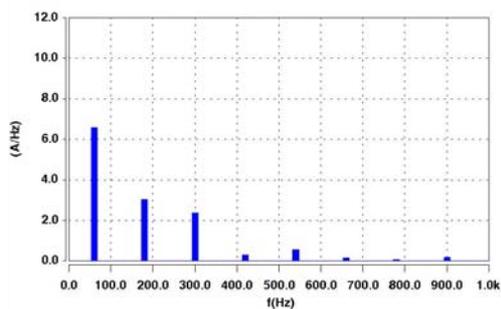
Linha A - carga não-linear - experimental



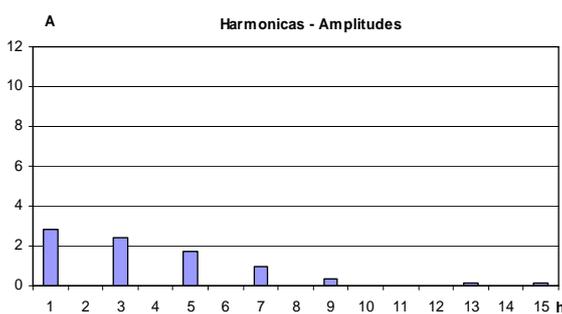
Linha A - carga não-linear - computacional



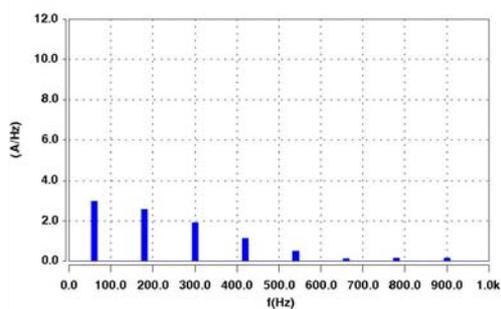
Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional



Linha C - carga não-linear - experimental

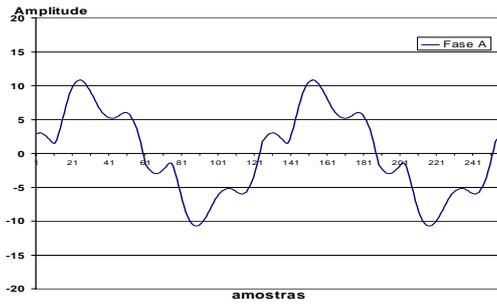


Linha C - carga não-linear - computacional

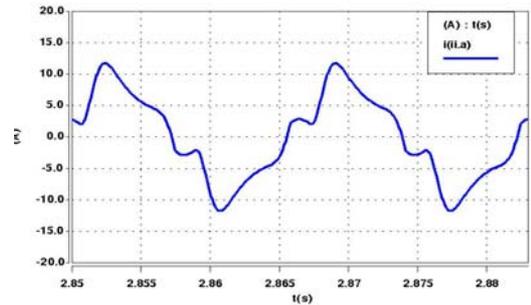
Figura 5.17 - Espectros harmônicos das correntes na carga não-linear - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência zero

(b) Corrente de linha do alimentador

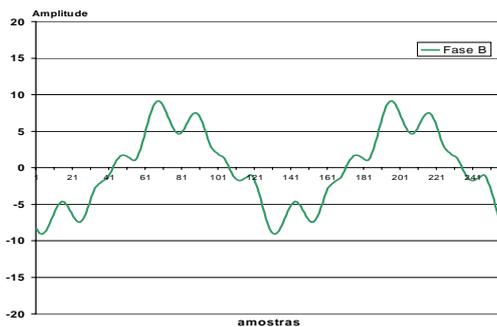
A figura 5.18 mostra, respectivamente, as correntes nas linhas A, B e C no alimentador, obtidas dos ensaios laboratoriais e simulações computacionais.



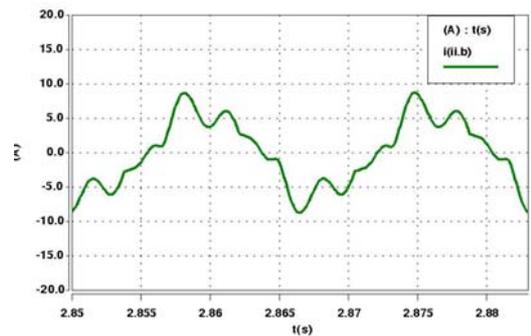
Linha A - alimentador - experimental



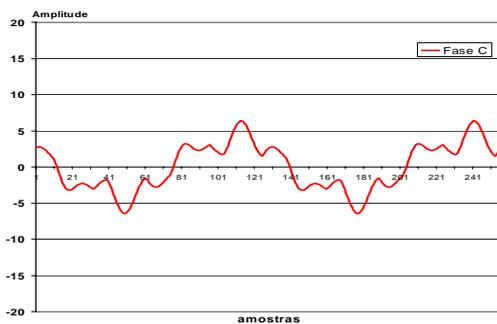
Linha A - alimentador - computacional



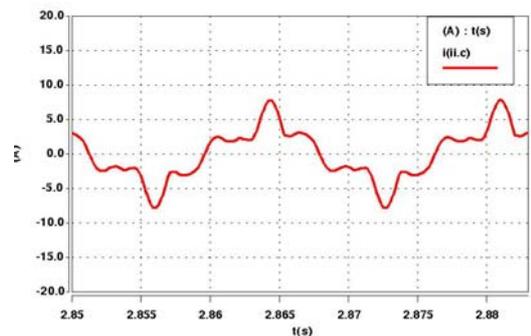
Linha B - alimentador - experimental



Linha B - alimentador - computacional



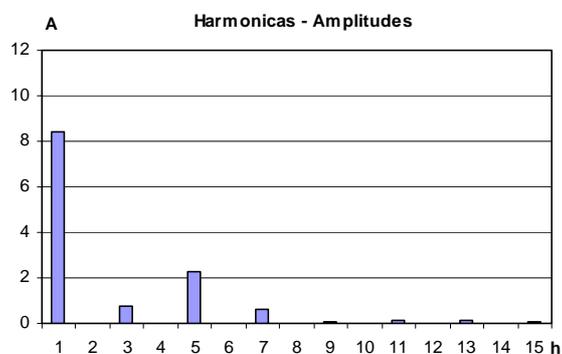
Linha C - alimentador - experimental



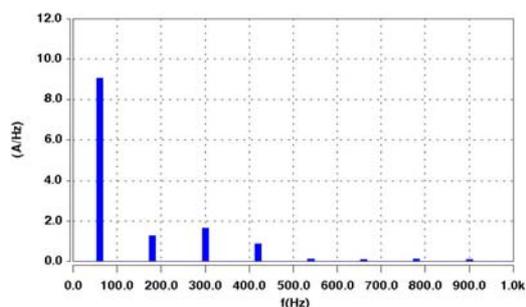
Linha C - alimentador - computacional

Figura 5.18 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência zero

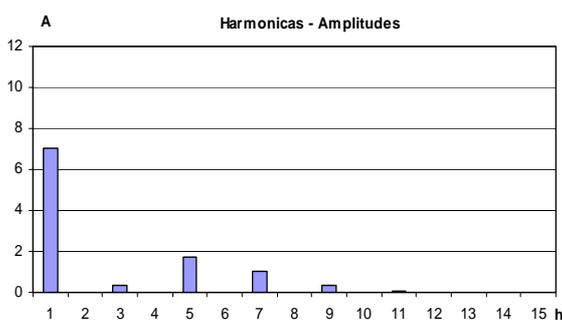
De modo análogo aos casos anteriores, a figura 5.19 é indicativa dos espectros harmônicos das correntes de pico na alimentação.



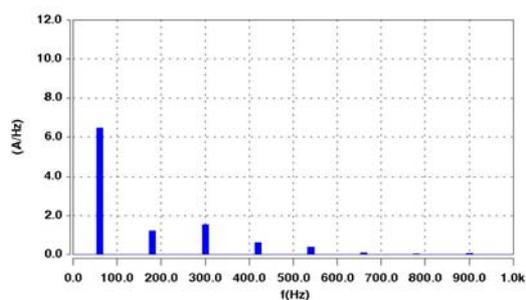
Linha A - alimentador - experimental



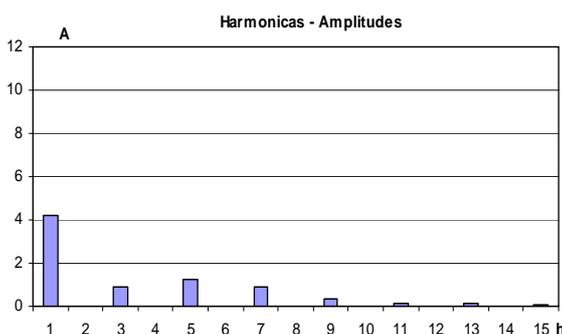
Linha A - alimentador - computacional



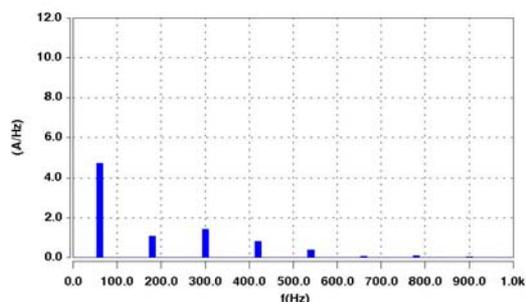
Linha B - alimentador - experimental



Linha B - alimentador - computacional



Linha C - alimentador - experimental

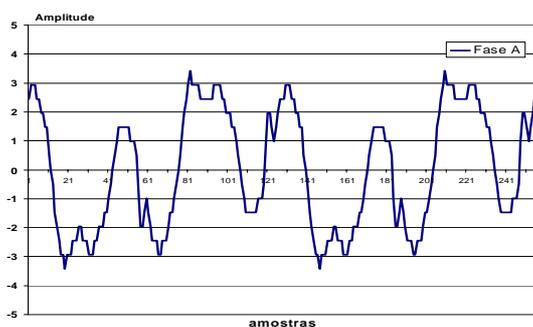


Linha C - alimentador - computacional

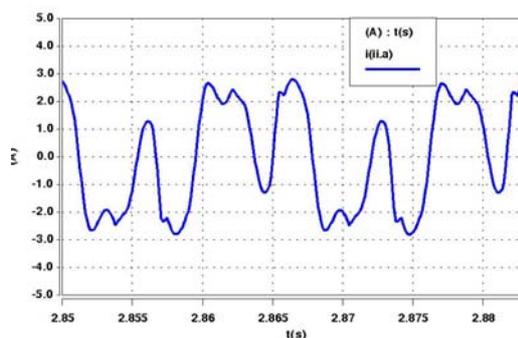
Figura 5.19 - Espectros harmônicos das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada

(c) Corrente de linha no filtro de seqüência zero

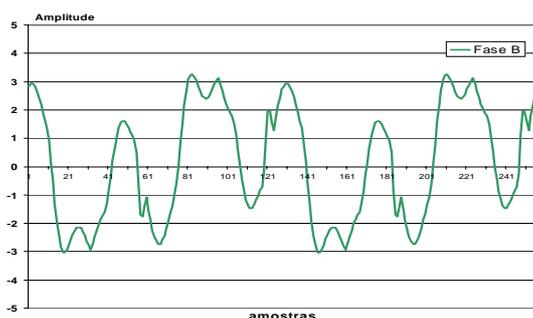
Por fim, a figura 5.20 fornece, respectivamente, as correntes de linha A, B e C do filtro eletromagnético, de forma experimental e computacional.



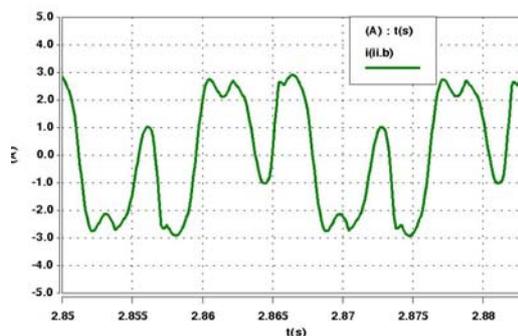
Linha A - filtro - experimental



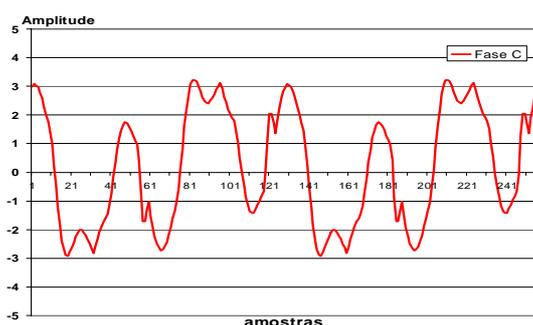
Linha A - filtro - computacional



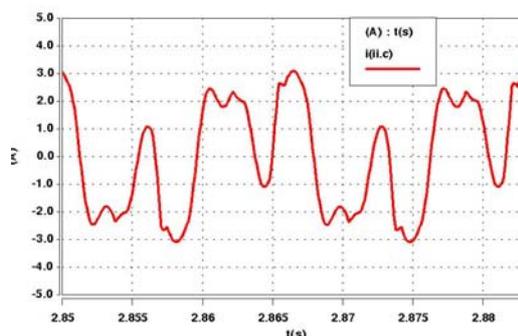
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



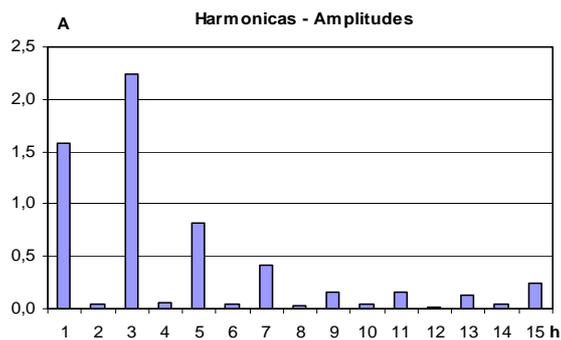
Linha C - filtro - experimental



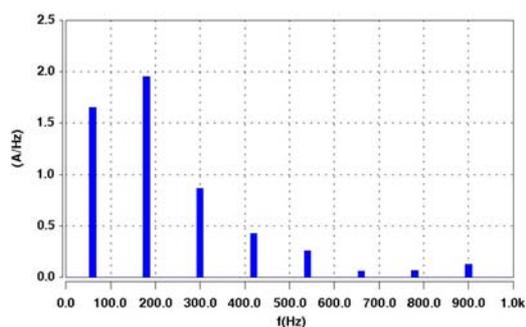
Linha C - filtro - computacional

Figura 5.20 - Formas de onda das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência zero

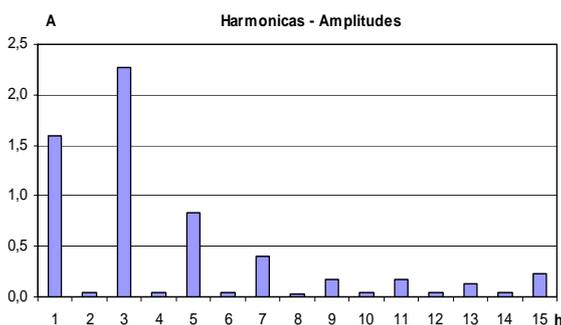
A figura 5.21 indica os correspondentes espectros harmônicos para as correntes de pico.



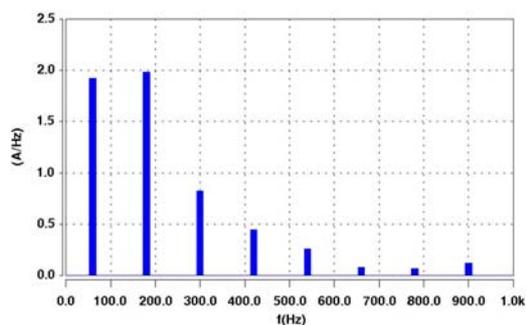
Linha A - filtro - experimental



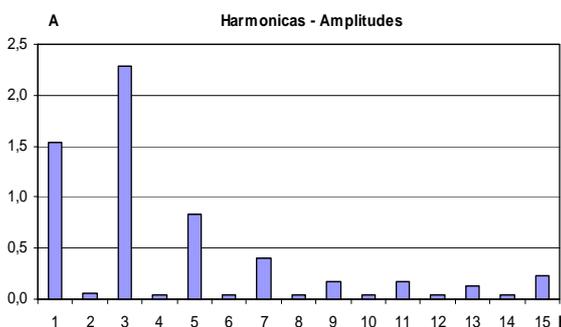
Linha A - filtro - computacional



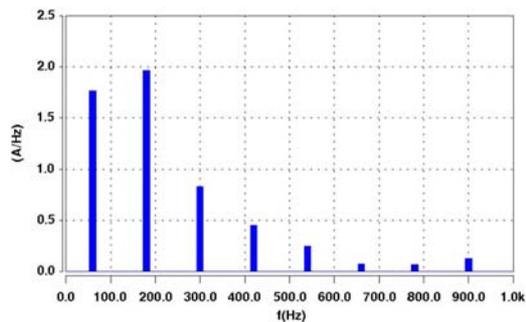
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



Linha C - filtro - experimental

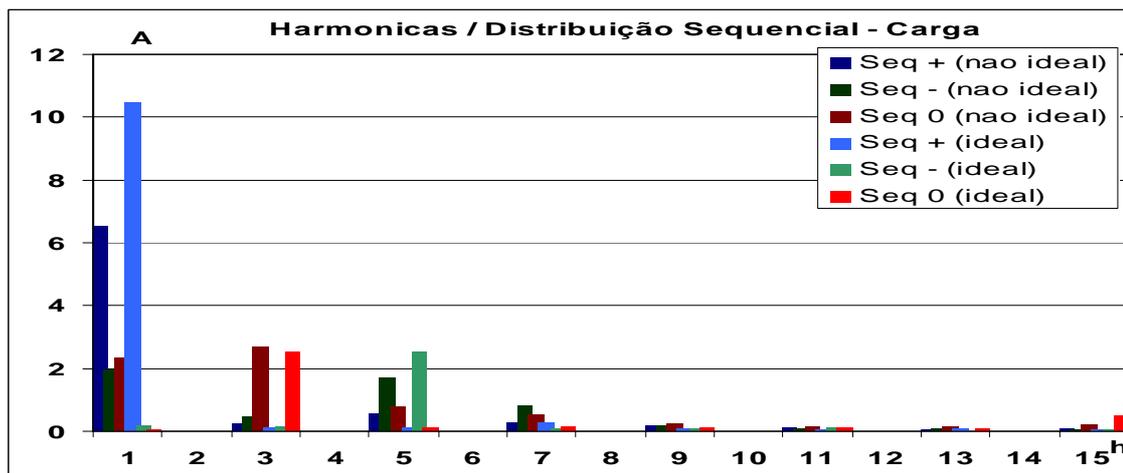


Linha C - filtro - computacional

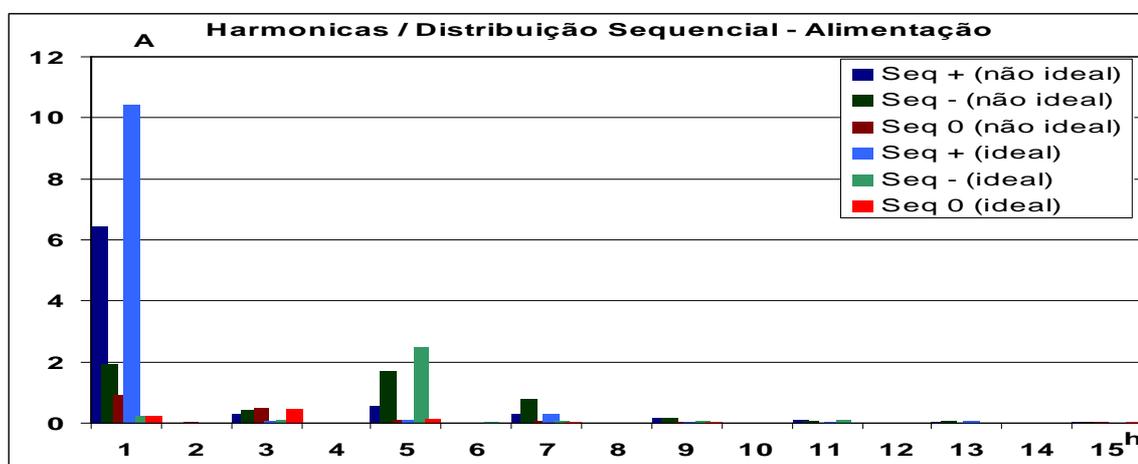
Figura 5.21 - Espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência zero

(d) Síntese das correntes de linha de acordo com as suas seqüências de fase

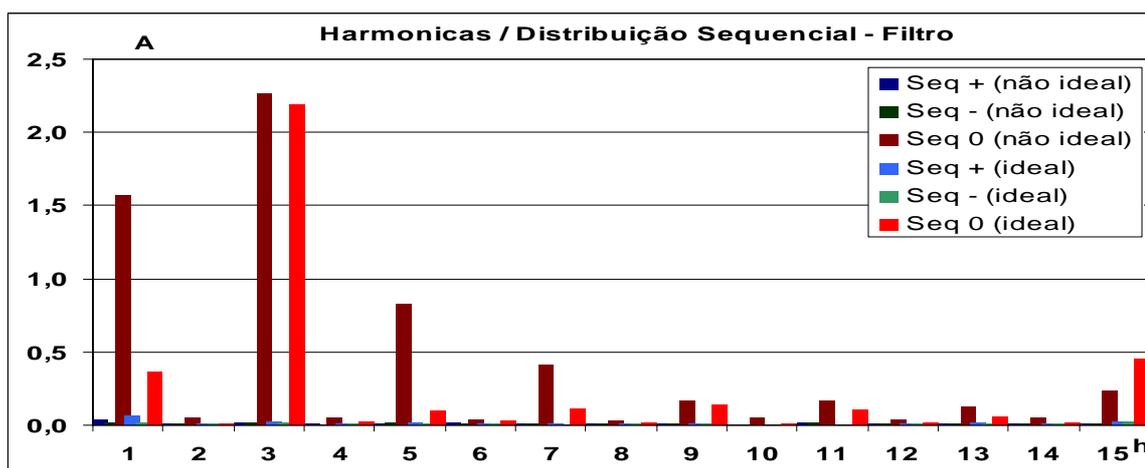
A figura 5.22 apresenta os espectros harmônicos, com a distribuição de seqüências positivas, negativas e zero das correntes de linha nos mesmos pontos analisados anteriormente. Apenas os resultados experimentais são considerados.



(a) Seqüência de fases para as correntes de linha na carga - experimental



(b) Seqüência de fases para as correntes de linha no alimentador - experimental



(c) Seqüência de fases para as correntes de linha no filtro - experimental

Figura 5.22 - Espectros harmônicos com distribuição seqüencial de fases para as correntes de linha na carga não-linear, alimentador e filtro de seqüência zero - senoidal e carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência zero

Os resultados evidenciam que a operação da carga não-linear desequilibrada contribuiu significativamente para o aumento da componente fundamental de corrente de seqüência zero. Também, observa-se que as componentes harmônicas são afetadas e o conjunto incrementa a corrente no filtro. Mais uma vez, fica constatado que o prévio conhecimento das condições operativas do filtro sob a ação de uma carga desequilibrada também se constitui em fator relevante ao correto dimensionamento e construção do filtro.

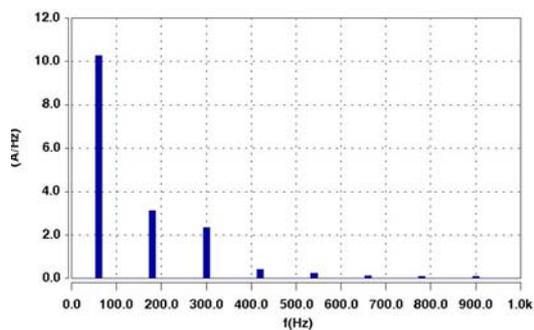
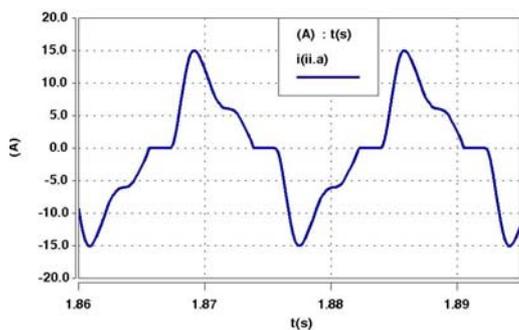
Caso a-4 - Variação da indutância de dispersão

Para fins da avaliação da alteração desta grandeza, a estratégia empregada consistiu em variar a área de dispersão do filtro eletromagnético, impactando, assim sobre o valor da indutância destacada.

Mantendo-se as condições operacionais estabelecidas na avaliação do capítulo anterior, e promovendo-se, desta vez, uma alteração expressiva no valor da indutância de dispersão do filtro (15 vezes maior), obteve-se, para o estudo computacional, os resultados constantes nas figuras 5.23-5.26.

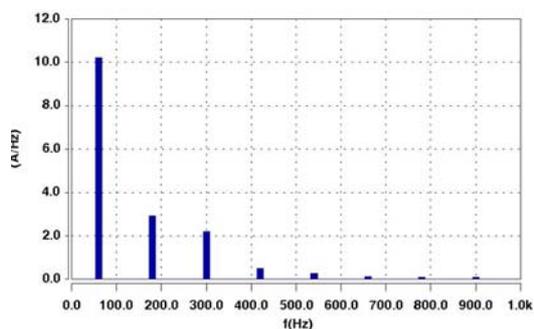
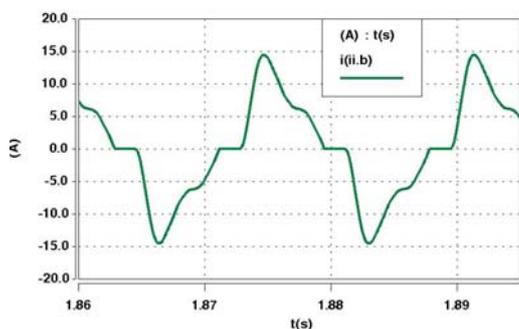
(a) Corrente na carga não-linear

A figura 5.23 apresenta as correntes de linha A, B e C obtidas na carga não-linear e os correspondentes espectros harmônicos, de forma computacional.



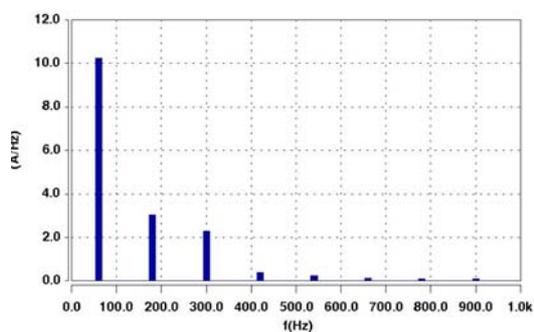
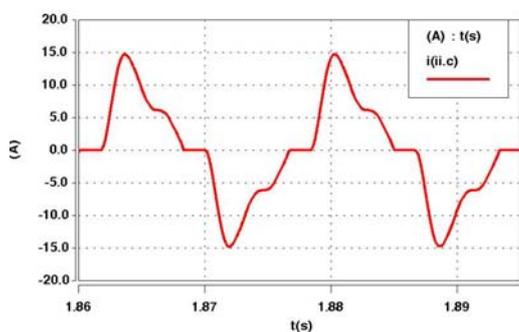
Linha A - carga não-linear - computacional

Linha A - carga não-linear - computacional



Linha B - carga não-linear - computacional

Linha B - carga não-linear - computacional



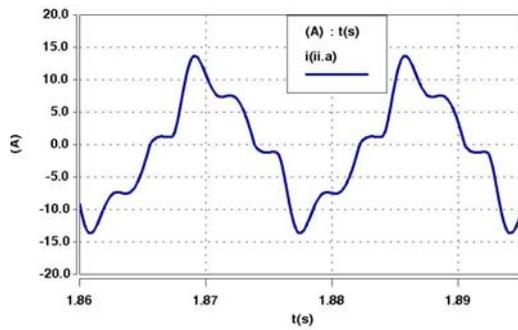
Linha C - carga não-linear - computacional

Linha C - carga não-linear - computacional

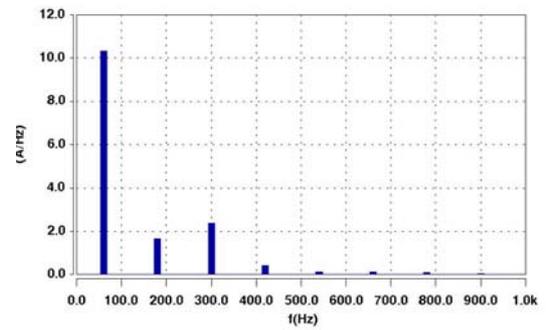
Figura 5.23 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear e respectivos espectros harmônicos - variação da indutância de dispersão - filtro de seqüência zero

(b) Corrente de linha do alimentador

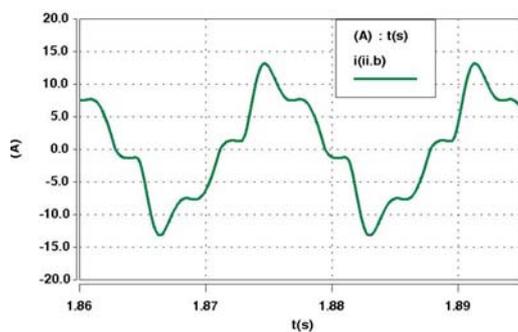
A figura 5.24 apresenta as correntes nas linhas A, B e C do alimentador, obtidas computacionalmente, e seus respectivos espectros harmônicos.



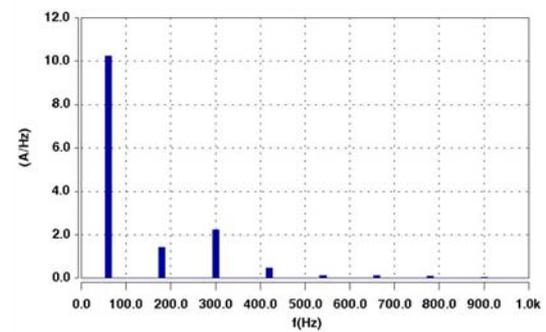
Linha A - alimentador - computacional



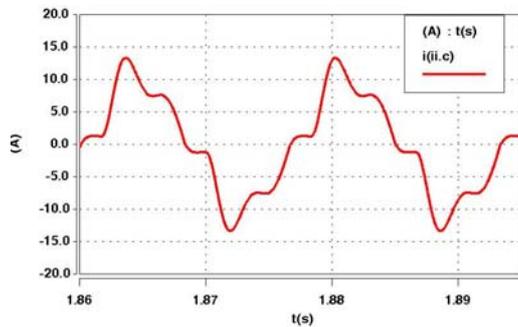
Linha A - alimentador - computacional



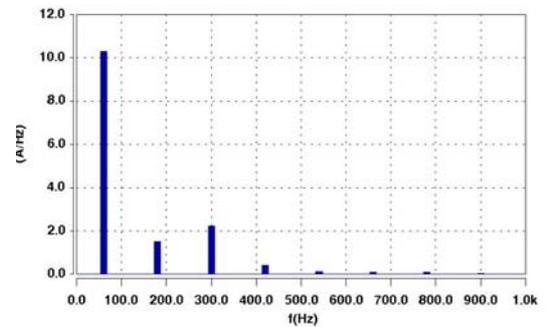
Linha B - alimentador - computacional



Linha B - alimentador - computacional



Linha C - alimentador - computacional

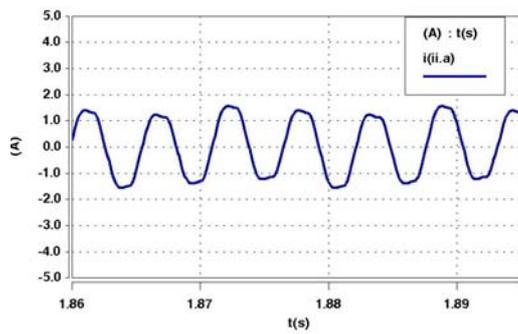


Linha C - alimentador - computacional

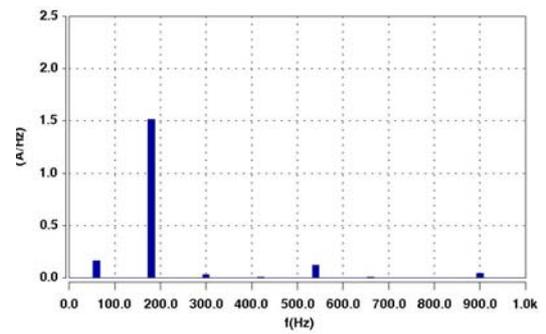
Figura 5.24 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador e respectivos espectros harmônicos - variação da indutância de dispersão - filtro de seqüência zero

(c) Corrente de linha do filtro de seqüência zero

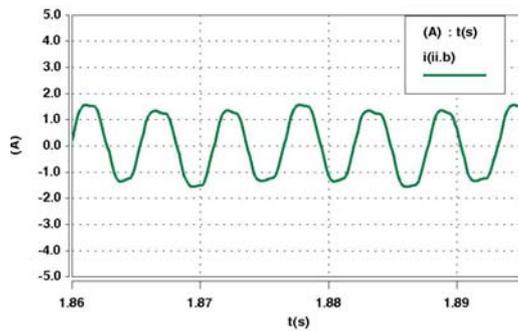
Por fim, as figuras 5.25 correspondem às correntes de linha A, B e C do filtro eletromagnético.



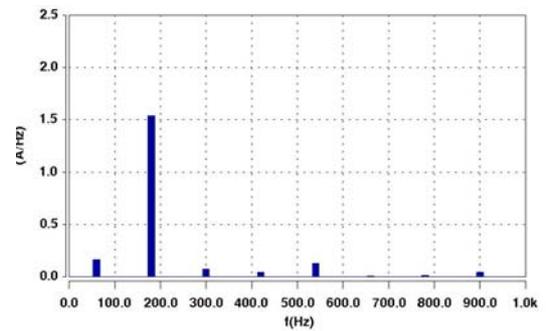
Linha A - filtro - computacional



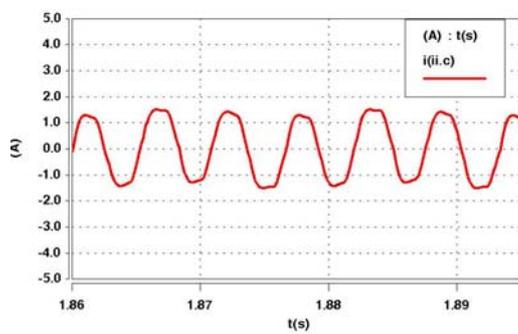
Linha A - filtro - computacional



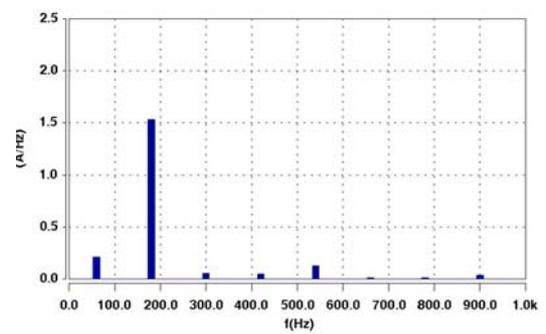
Linha B - filtro - computacional



Linha B - filtro - computacional



Linha C - filtro - computacional

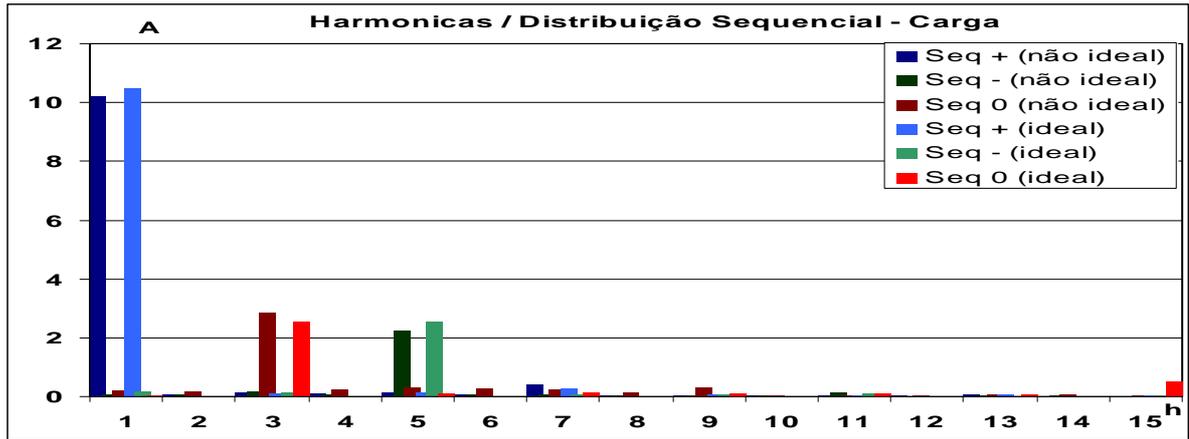


Linha C - filtro - computacional

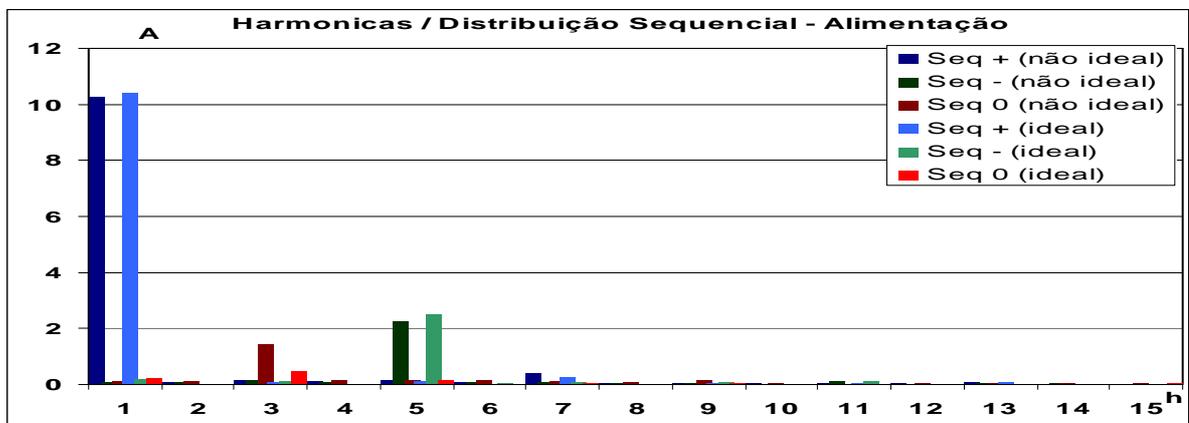
Figura 5.25 - Formas de onda das correntes de linha no filtro e respectivos espectros harmônicos - variação da indutância de dispersão - filtro de seqüência zero

(d) Síntese das correntes de linha de acordo com as suas seqüências de fase

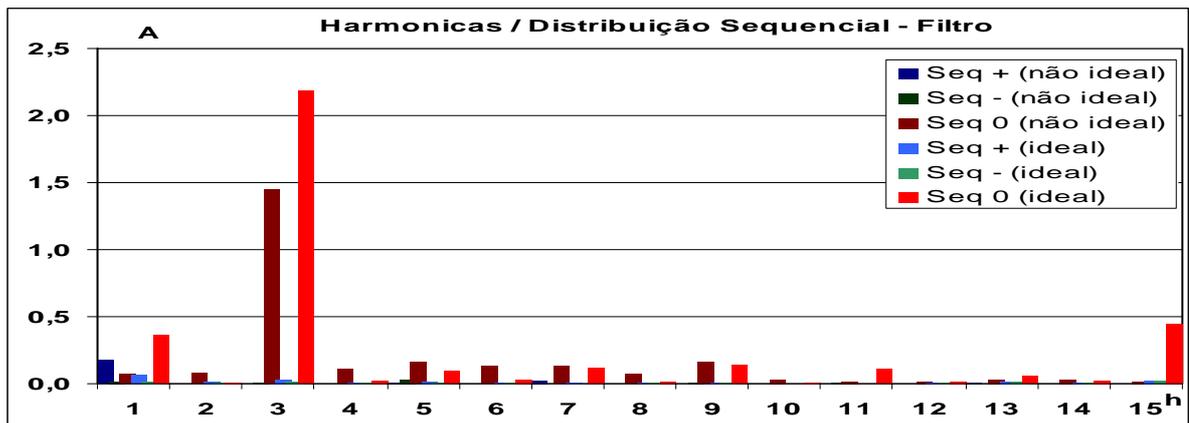
A figura 5.26 apresenta os espectros harmônicos com a distribuição de seqüências positivas, negativas e zero das correntes de pico para os mesmos pontos analisados anteriormente. Apenas os resultados computacionais são considerados e as cores destacam a seqüência de fases da componente harmônica sob foco.



(a) Sequência de fases para as correntes de linha na carga - experimental



(b) Sequência de fases para as correntes de linha no alimentador - experimental



(c) Sequência de fases para as correntes de linha no filtro - experimental

Figura 5.26 - Espectros harmônicos com distribuição sequencial de fases para as correntes de linha na carga não-linear, alimentador e filtro - ideal e variação da dispersão - filtro de sequência zero

Como resultado do aumento de dispersão, é possível observar, através da figura 5.26, que o filtro absorve uma menor corrente de seqüência zero (3ª e 9ª ordens). Não obstante a este fato, é importante ressaltar que a perda de eficácia não foi proporcional ao aumento da indutância de dispersão. Isto é um reflexo da correlação entre as impedâncias do filtro e do sistema, sendo esta última bastante elevada em relação à primeira.

5.2.2 - FILTRO DE SEQÜÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA

Dando continuidade aos estudos, esta seção objetiva avaliar o desempenho do filtro de seqüência positiva e negativa a partir das situações enfocadas na tabela 5.1. Para tanto, o mesmo arranjo físico identificado na figura 4.18, e repetido na forma da figura 5.27, é utilizado para os trabalhos subseqüentes.

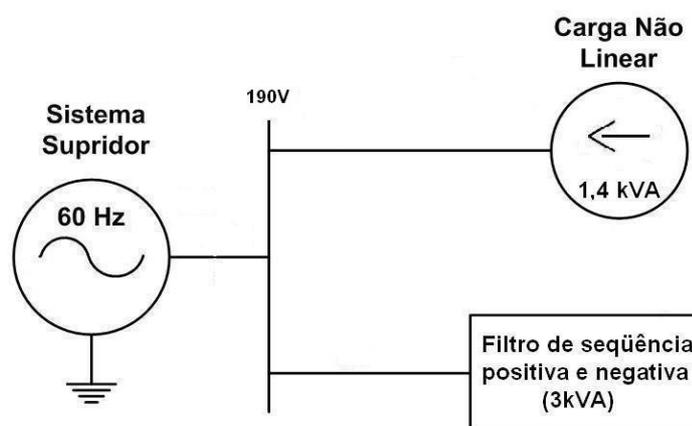


Figura 5.27 - Arranjo físico utilizado para os estudos computacionais e experimentais - filtro de seqüência positiva e negativa

Caso b-1 - Alimentação com tensão senoidal desequilibrada

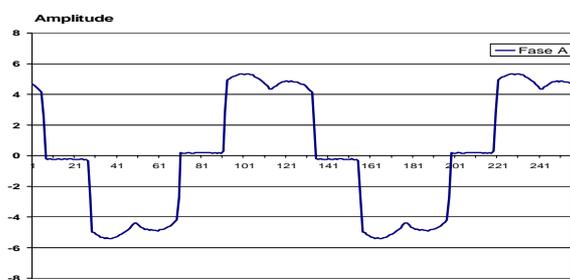
Como forma de avaliar o desempenho do filtro em questão diante de tensões desequilibradas, adotou-se uma assimetria responsável por um fator de desequilíbrio de 3%

(V_A^-/V_A^+) , mantendo-se as demais características idênticas às condições ideais de funcionamento.

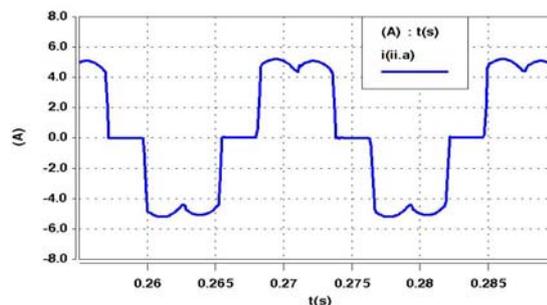
Os resultados a seguir apresentam, respectivamente, as correntes de linha na carga não-linear, na alimentação e, por fim, no filtro eletromagnético de seqüência positiva e negativa.

(a) Corrente na carga não-linear

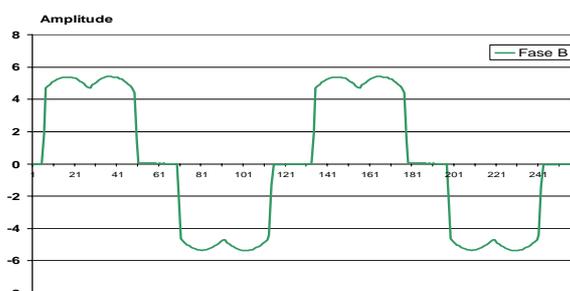
A figura 5.28 fornece as correntes nas linhas A, B e C registradas na carga não-linear, obtidas de forma experimental e computacional.



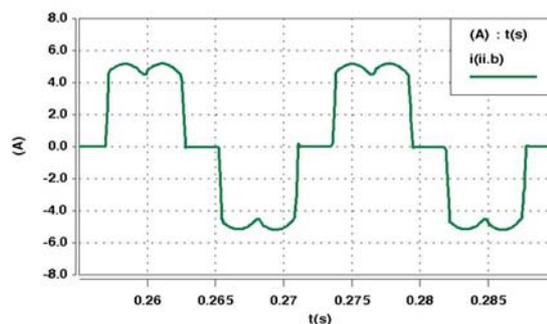
Linha A - carga não-linear - experimental



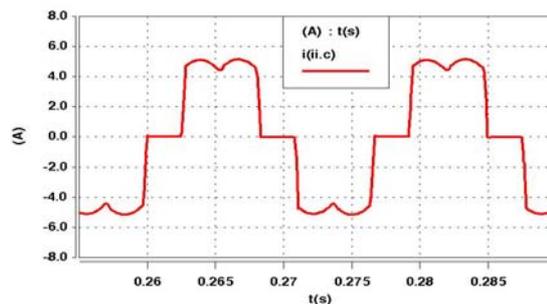
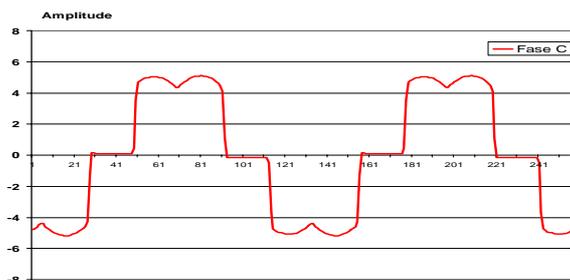
Linha A - carga não-linear - computacional



Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional

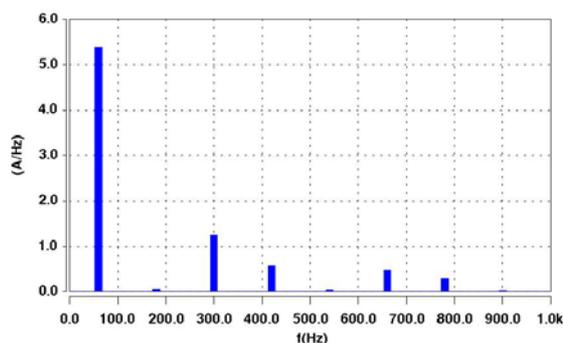
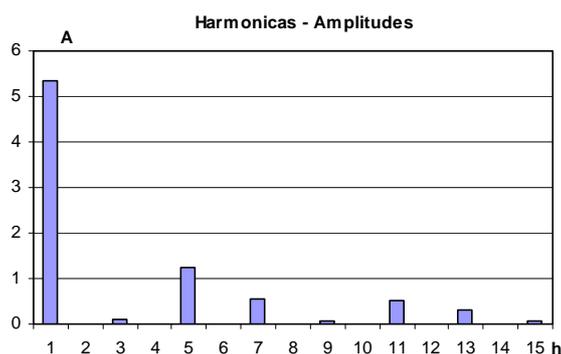


Linha C - carga não-linear - experimental

Linha C - carga não-linear - computacional

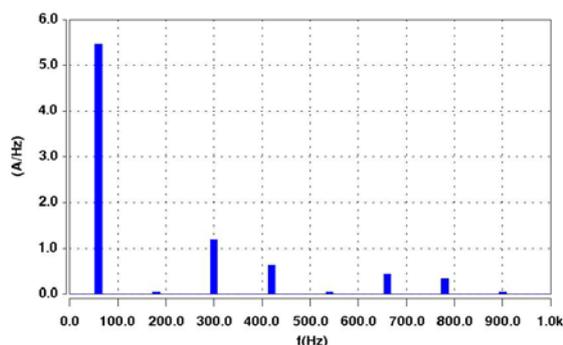
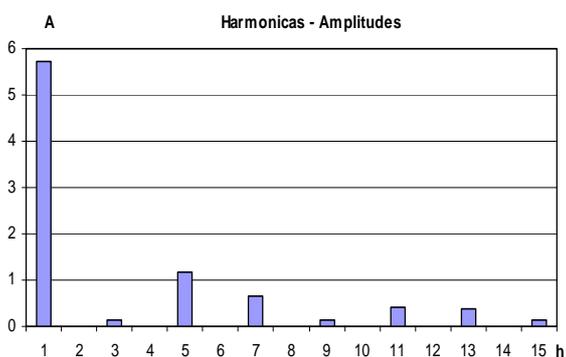
Figura 5.28 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência positiva e negativa

Complementarmente, a figura 5.29 indica os correspondentes espectros de frequência para as correntes de pico da figura 5.28.



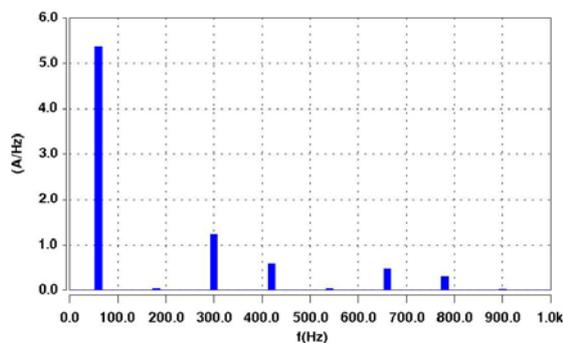
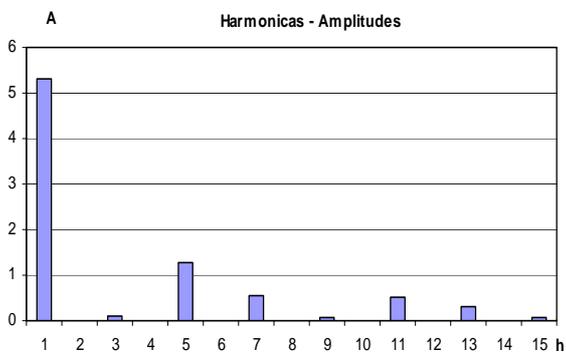
Linha A - carga não-linear - experimental

Linha A - carga não-linear - computacional



Linha B - carga não-linear - experimental

Linha B - carga não-linear - computacional



Linha C - carga não-linear - experimental

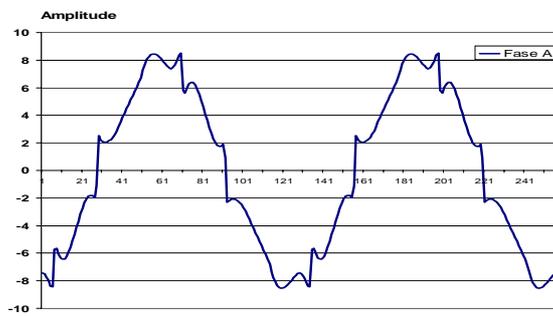
Linha C - carga não-linear - computacional

Figura 5.29 - Espectros harmônicos das correntes de linha na carga não-linear - experimental e

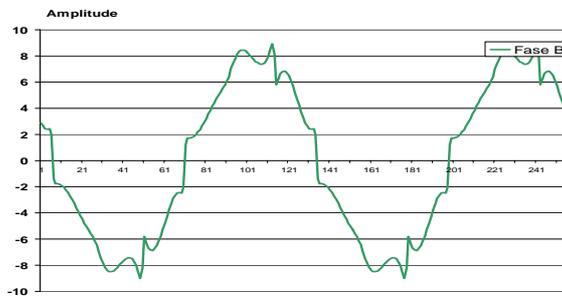
computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência positiva e negativa

(b) Corrente de linha no alimentador

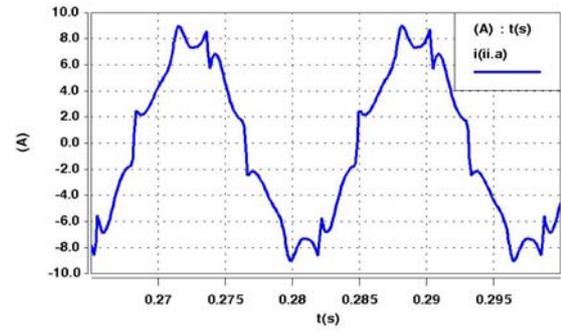
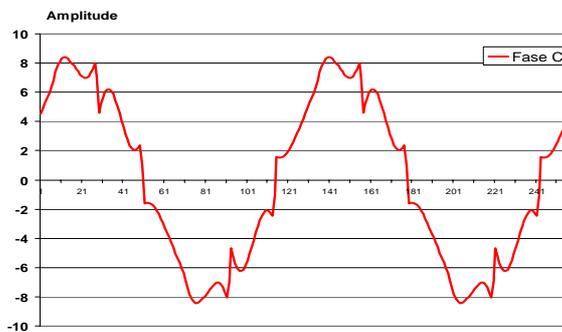
Enfocando, na seqüência, as correntes experimentais e computacionais para o alimentador, a figura 5.30 apresenta, respectivamente, nas linhas A, B e C.



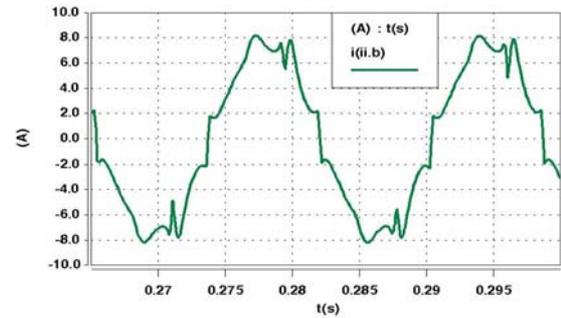
Linha A - alimentador - experimental



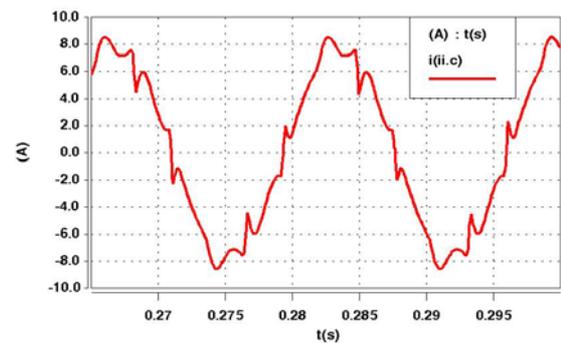
Linha B - alimentador - experimental



Linha A - alimentador - computacional



Linha B - alimentador - computacional

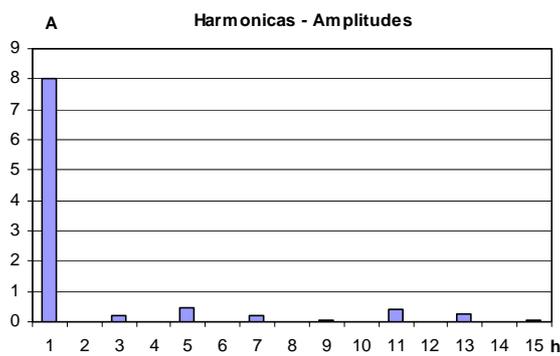


Linha C - alimentador - experimental

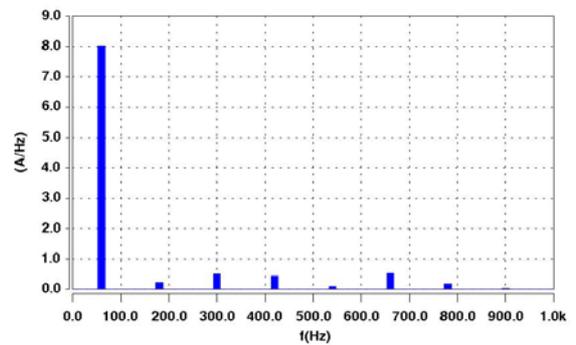
Linha C - alimentador - computacional

Figura 5.30 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência positiva e negativa

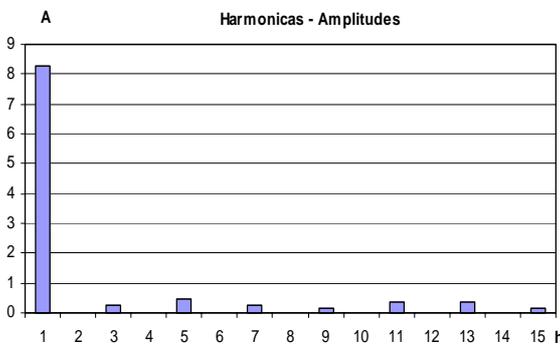
De modo análogo ao caso anterior, a figura 5.31 é indicativa dos espectros harmônicos das correntes anteriormente referidas, em valores de pico.



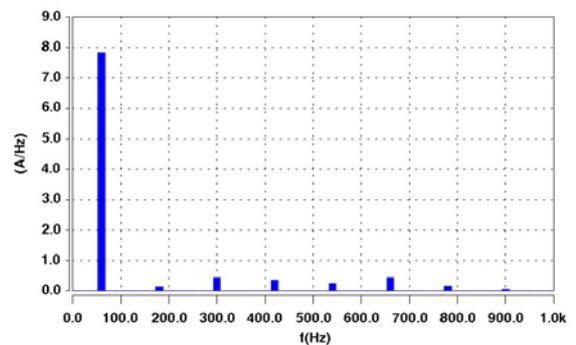
Linha A - alimentador - experimental



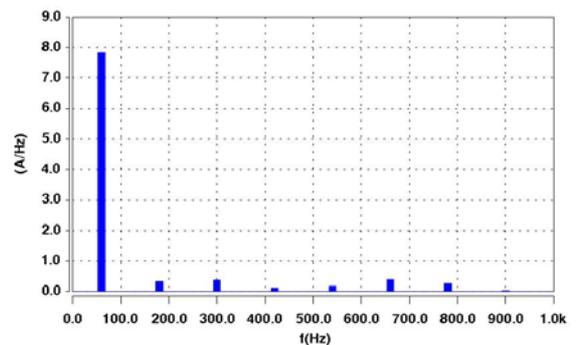
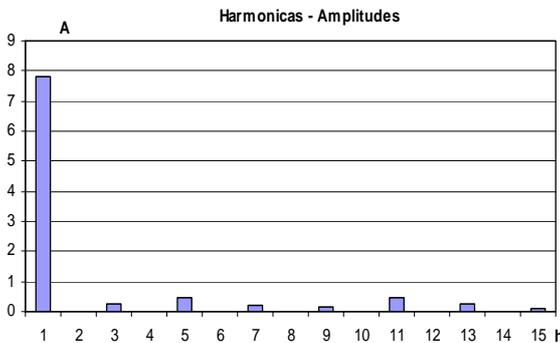
Linha A - alimentador - computacional



Linha B - alimentador - experimental



Linha B - alimentador - computacional



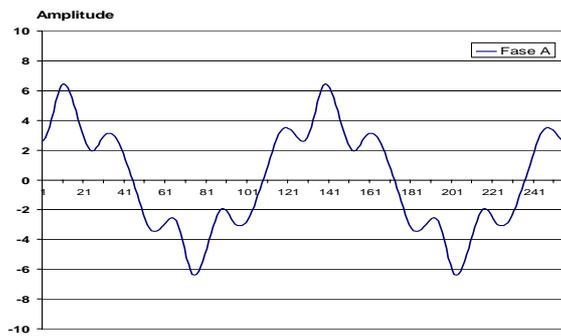
Linha C - alimentador - experimental

Linha C - alimentador - computacional

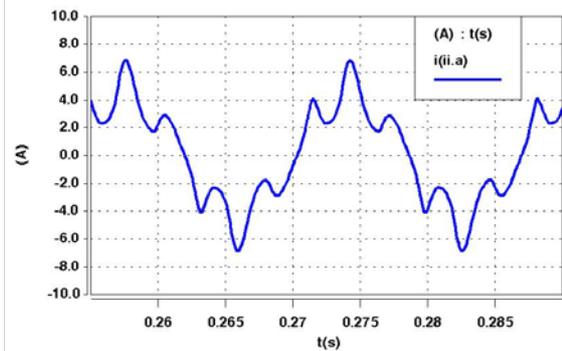
Figura 5.31 - Espectros harmônicos das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência positiva e negativa

(c) Corrente de linha no filtro de seqüência positiva e negativa

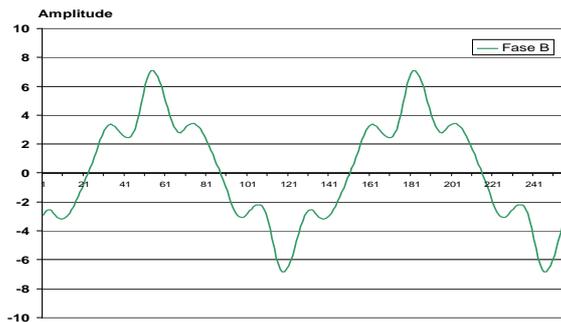
Por fim, a figura 5.32 apresenta as correntes de linha A, B e C lidas no filtro eletromagnético.



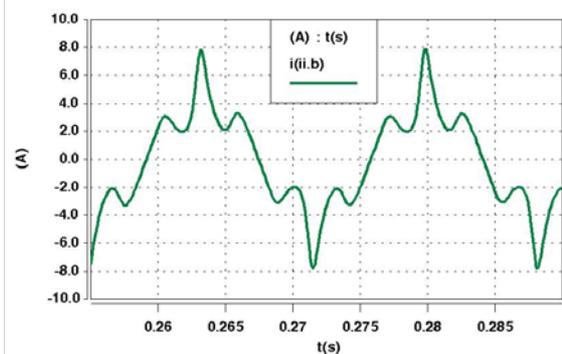
Linha A - filtro - experimental



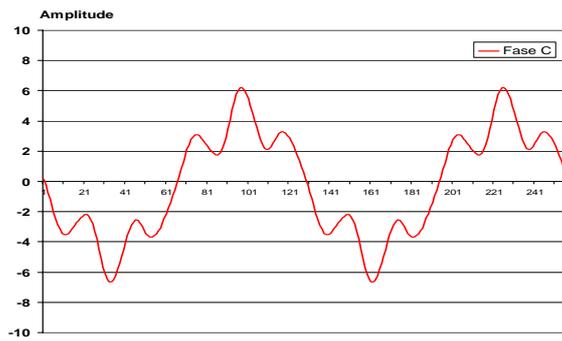
Linha A - filtro - computacional



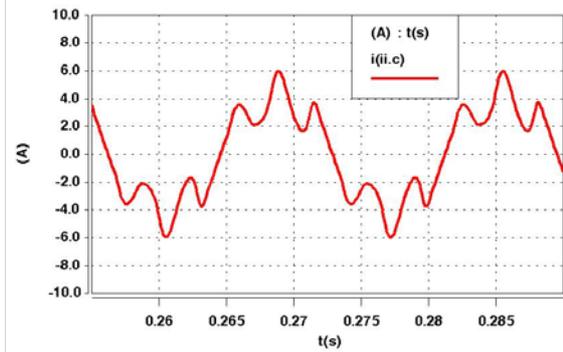
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



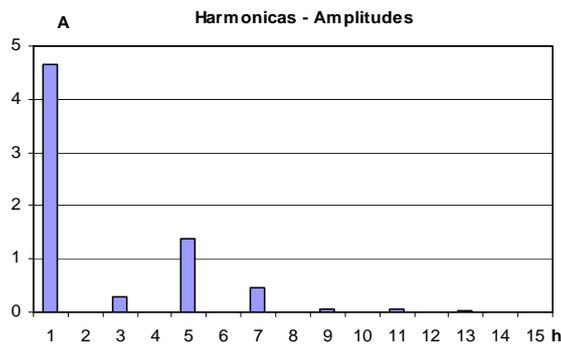
Linha C - filtro - experimental



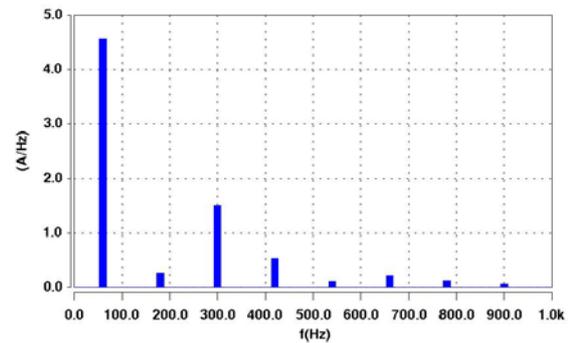
Linha C - filtro - computacional

Figura 5.32 - Formas de onda das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência positiva e negativa

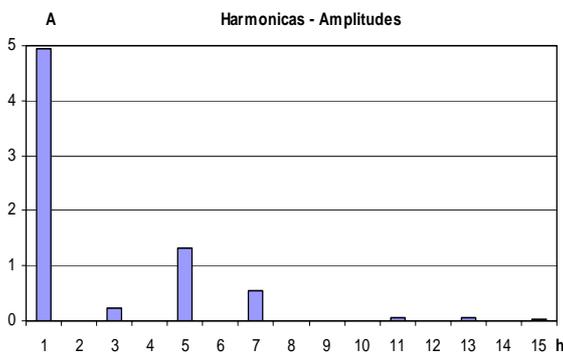
A figura 5.33 indica os correspondentes espectros harmônicos em valores de pico.



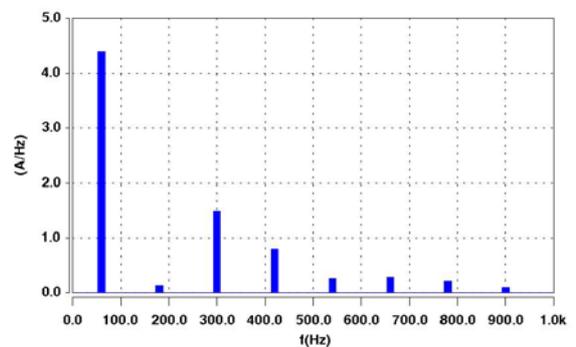
Linha A - filtro - experimental



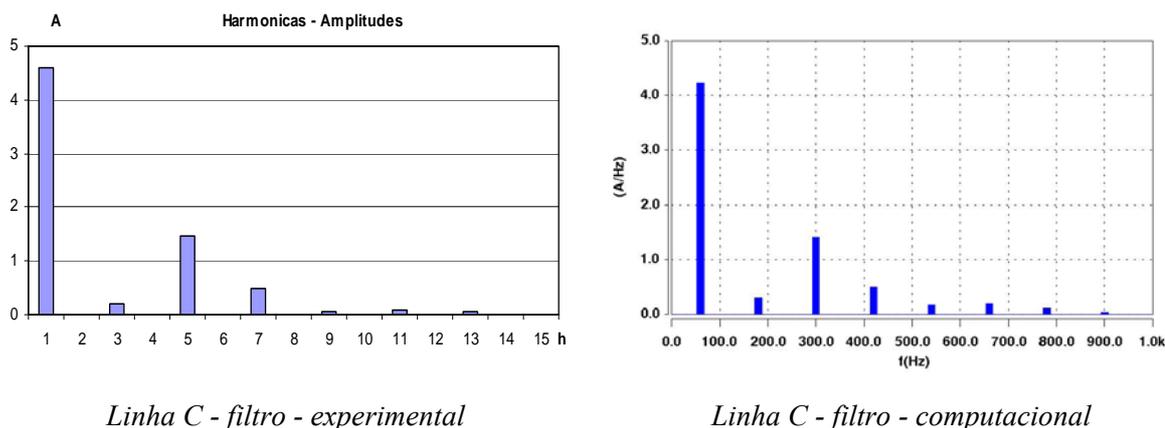
Linha A - filtro - computacional



Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



Linha C - filtro - experimental

Linha C - filtro - computacional

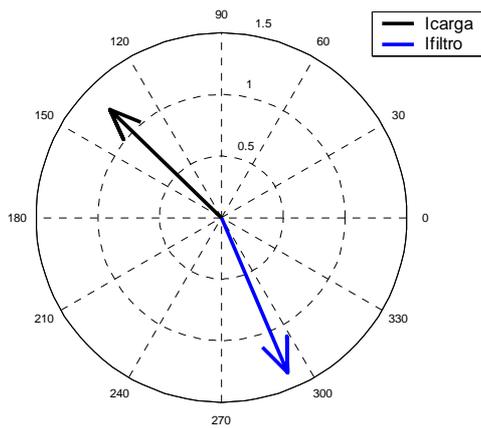
Figura 5.33 - Espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência positiva e negativa

(d) Síntese dos resultados

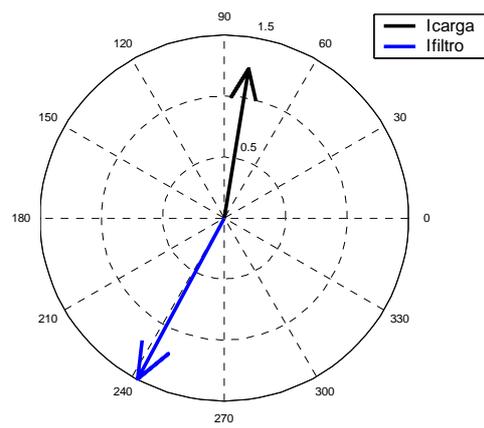
Objetivando um melhor entendimento sobre o desempenho do filtro eletromagnético sob enfoque, diante de condições de um suprimento desequilibrado, nos termos investigados, as figuras 5.34 e 5.35 oferecem um mecanismo simples e eficiente para uma visualização do desempenho do processo de compensação. Para simplificar a análise, apenas os fasores correspondentes às componentes harmônicas de 5ª e 7ª ordem foram considerados. Nestes diagramas, tal como aconteceu para o caso ideal de suprimento, ficam evidenciadas as compensações harmônicas destas ordens.

A comparação destes diagramas com aqueles constantes nas figuras 4.25 e 4.26, relativos ao suprimento de tensão ideal, evidencia a vulnerabilidade desta metodologia com relação ao desvio do padrão ideal da tensão de suprimento, aqui admitida na forma de 3% de desequilíbrio. Deste modo, verifica-se que, quando o filtro eletromagnético é alimentado com uma tensão diferente daquela projetada para o seu funcionamento, os fasores das componentes harmônicas de 5ª e 7ª ordem geradas por ele se modificam. Isto é uma decorrência normal

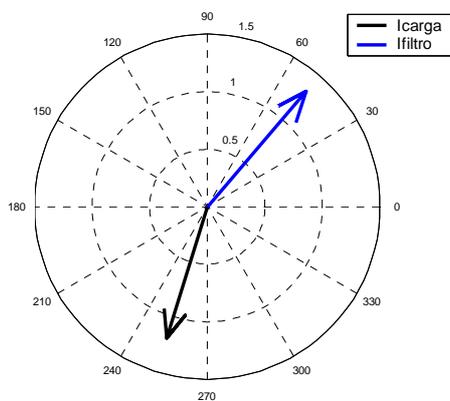
relacionada com o ponto de saturação atingido e definido pela característica da curva BxH do material magnético. Este desvio promove uma menor compensação harmônica das correntes oriundas da carga não-linear.



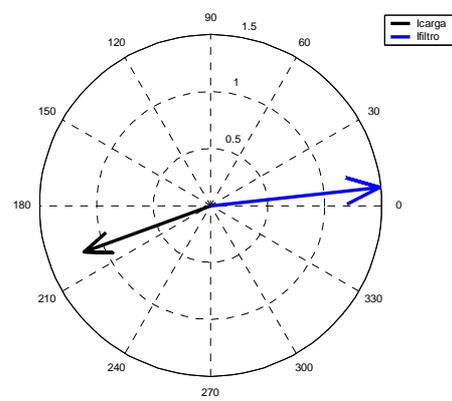
Linha A - experimental - 5ª ordem



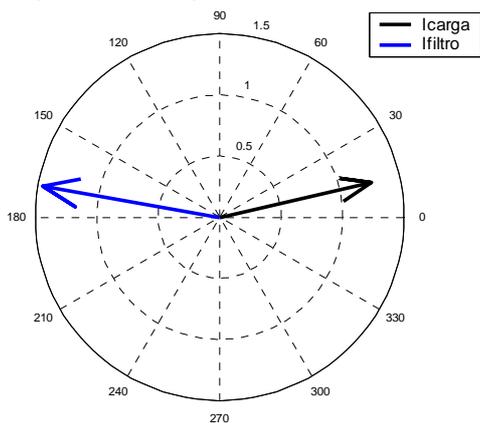
Linha A - computacional - 5ª ordem



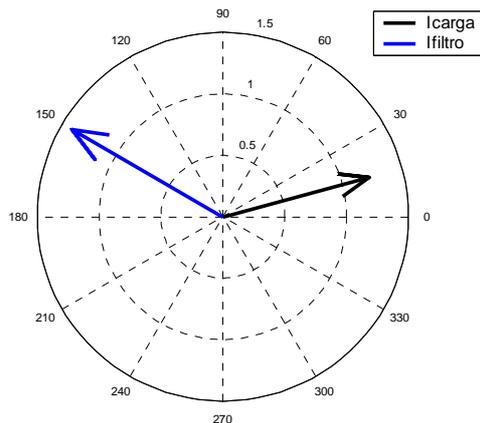
Linha B - experimental - 5ª ordem



Linha B - computacional - 5ª ordem

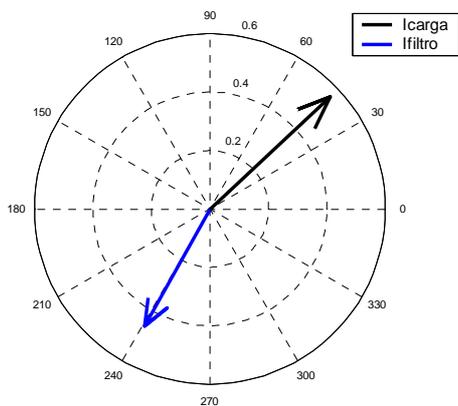


Linha C - experimental - 5ª ordem

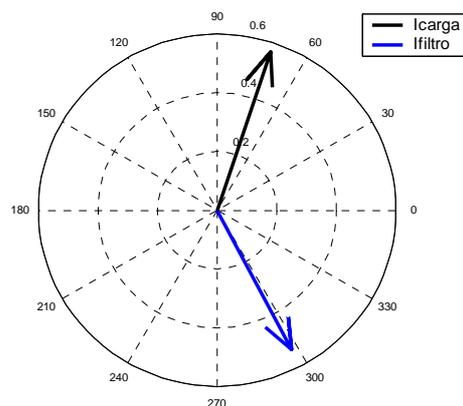


Linha C - computacional - 5ª ordem

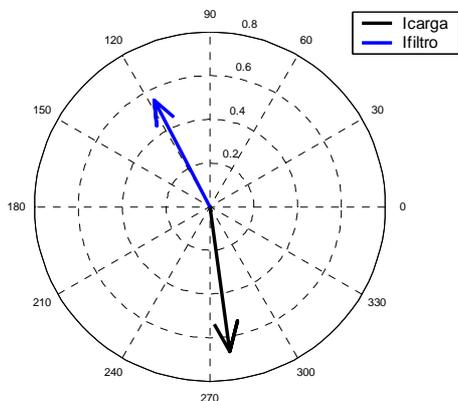
Figura 5.34 - Diagramas fasoriais das correntes de linha na carga e no filtro - experimental e computacional - tensão de suprimento desequilibrada - 5ª ordem - filtro de seqüência positiva e negativa



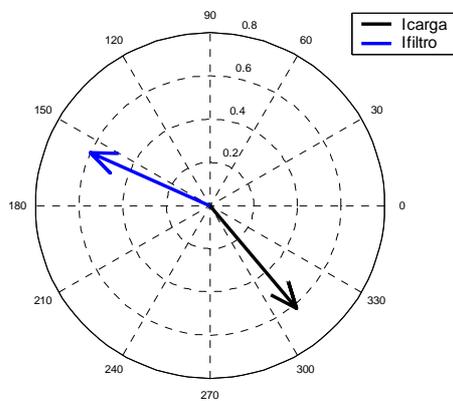
Linha A - experimental - 7ª ordem



Linha A - computacional - 7ª ordem

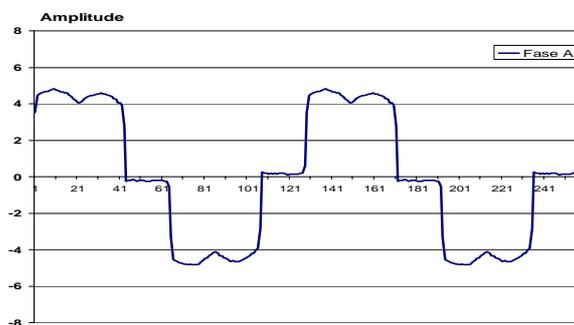


Linha B - experimental - 7ª ordem

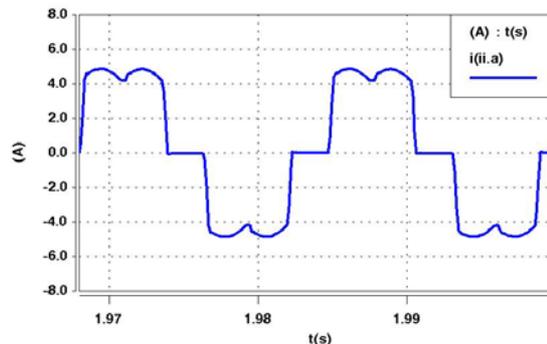


Linha B - computacional - 7ª ordem

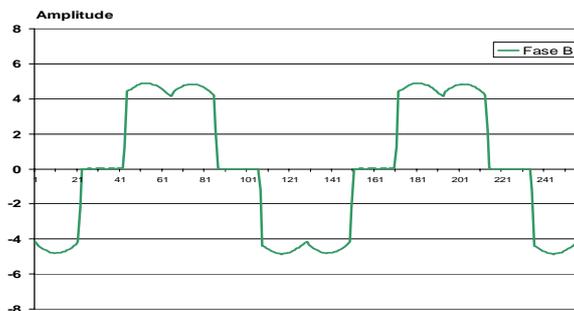
Complementarmente, a figura 5.37 fornece os correspondentes espectros de frequência para as correntes anteriores, em valores de pico.



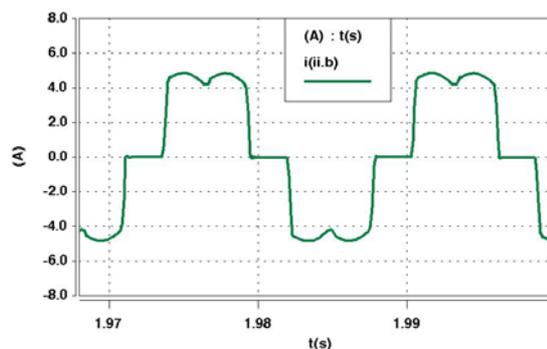
Linha A - carga não-linear - experimental



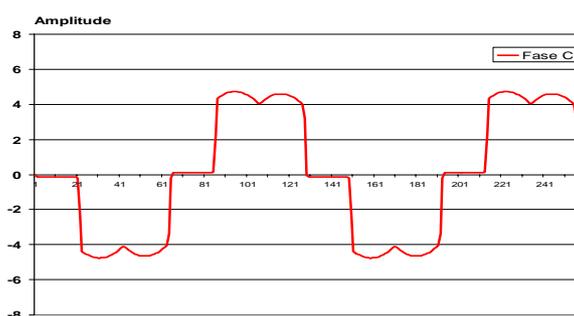
Linha A - carga não-linear - computacional



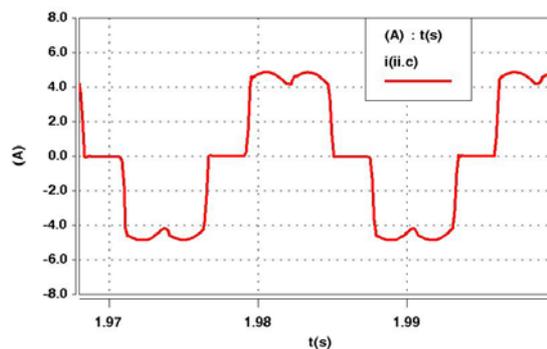
Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional

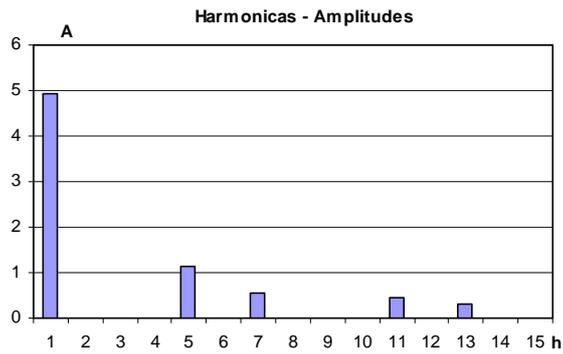


Linha C - carga não-linear - experimental

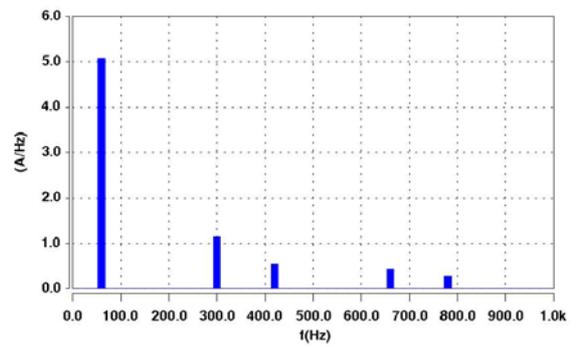


Linha C - carga não-linear - computacional

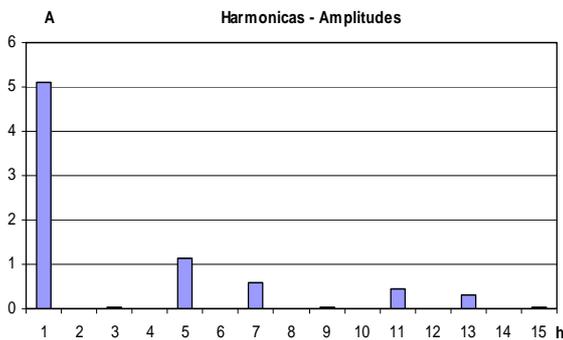
Figura 5.36 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - tensão de suprimento reduzida - filtro de seqüência positiva e negativa



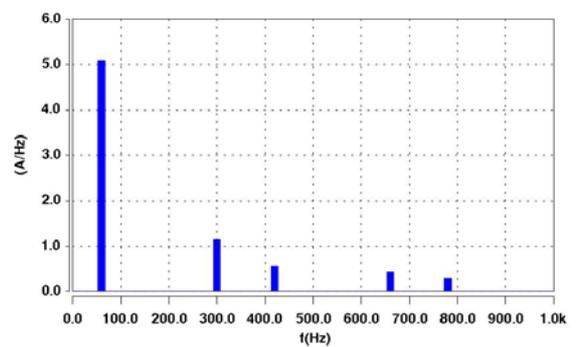
Linha A - carga não-linear - experimental



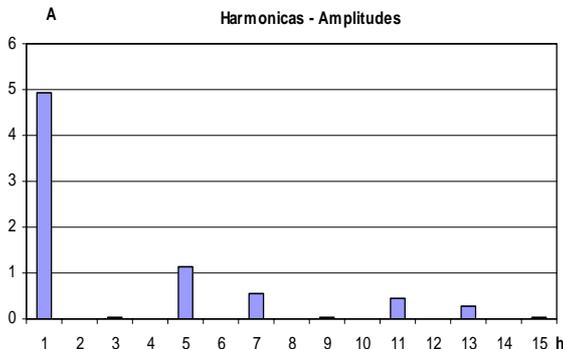
Linha A - carga não-linear - computacional



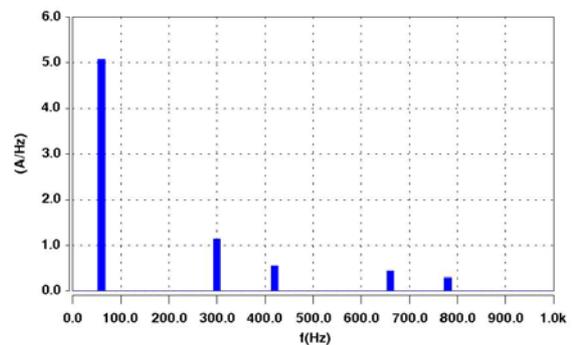
Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional



Linha C - carga não-linear - experimental

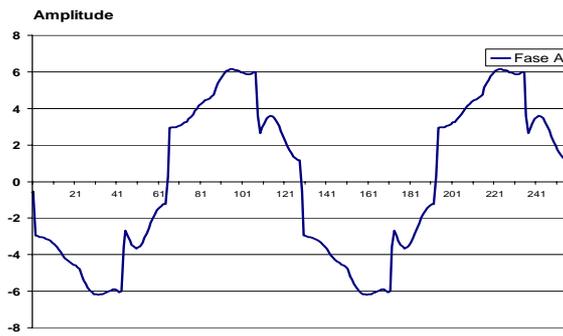


Linha C - carga não-linear - computacional

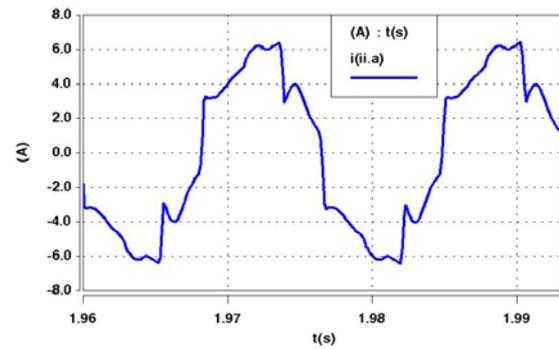
Figura 5.37 - Espectros harmônicos das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - tensão de suprimento reduzida - filtro de seqüência positiva e negativa

(b) Corrente de linha no alimentador

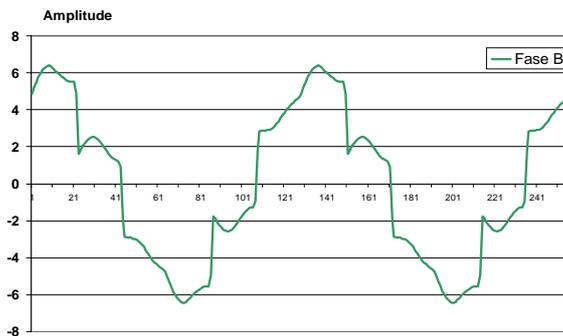
A figura 5.38 é indicativa das correspondentes correntes nas linhas A, B e C do alimentador.



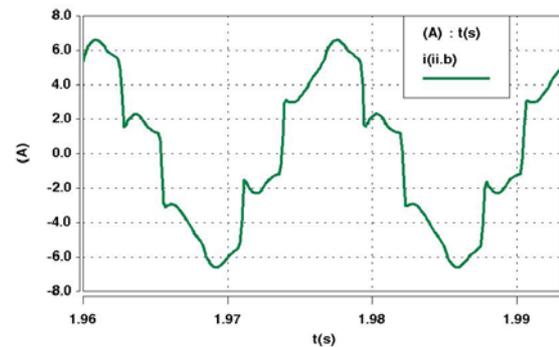
Linha A - alimentador - experimental



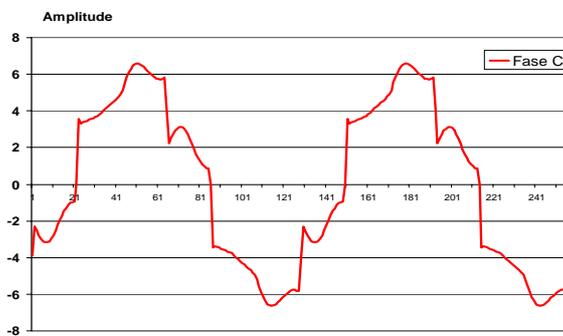
Linha A - alimentador - computacional



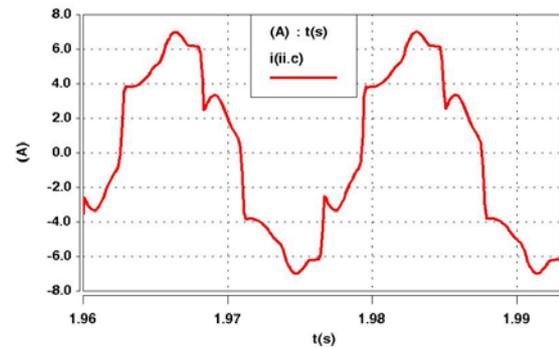
Linha B - alimentador - experimental



Linha B - alimentador - computacional



Linha C - alimentador - experimental



Linha C - alimentador - computacional

Figura 5.38 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - tensão de suprimento reduzida - filtro de seqüência positiva e negativa

De modo análogo ao caso anterior, a figura 5.39 é indicativa dos espectros harmônicos das correntes registradas no alimentador, novamente, em valores de pico.

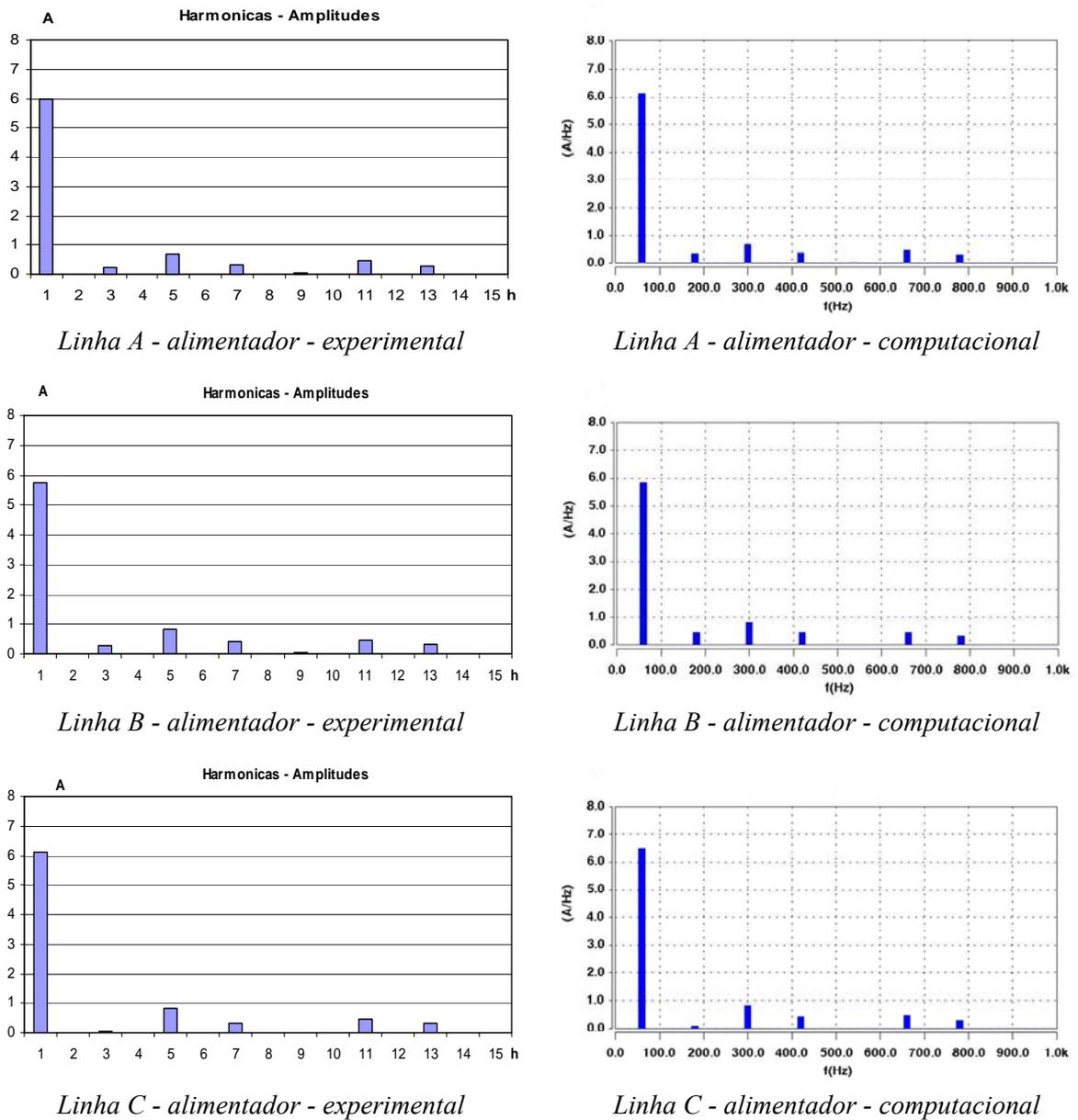
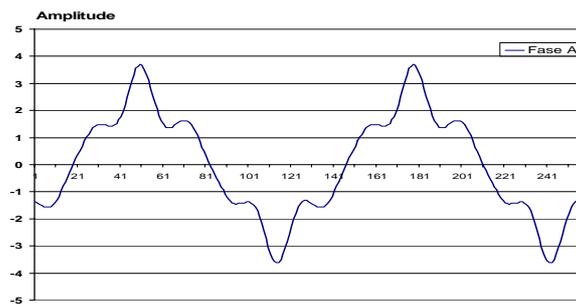


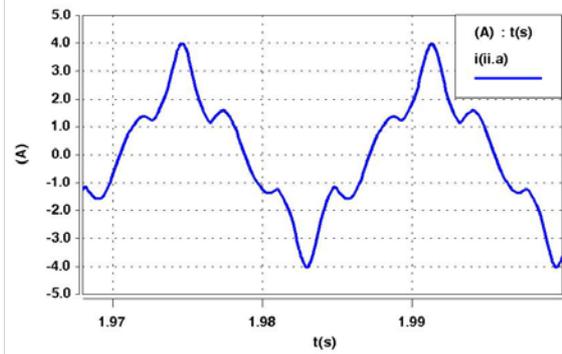
Figura 5.39 - Espectros harmônicos das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - tensão de suprimento reduzida - filtro de seqüência positiva e negativa

(c) Corrente de linha no filtro de seqüência positiva e negativa

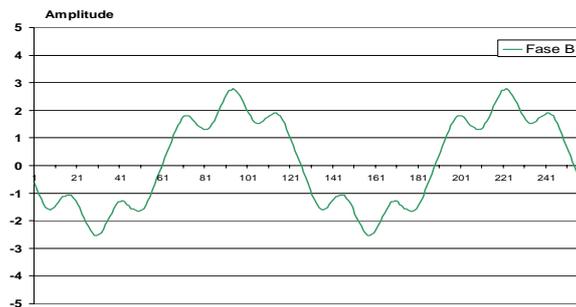
Por fim, a figura 5.40 apresenta, respectivamente, as correntes de linha A, B e C do filtro eletromagnético.



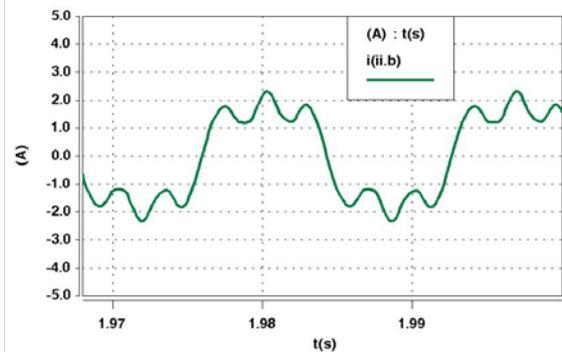
Linha A - filtro - experimental



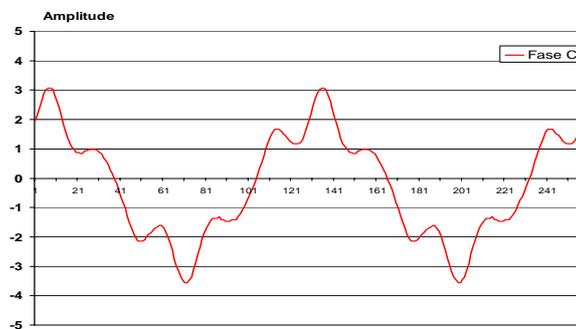
Linha A - filtro - computacional



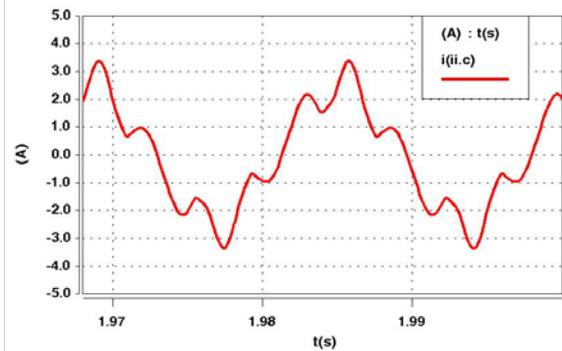
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



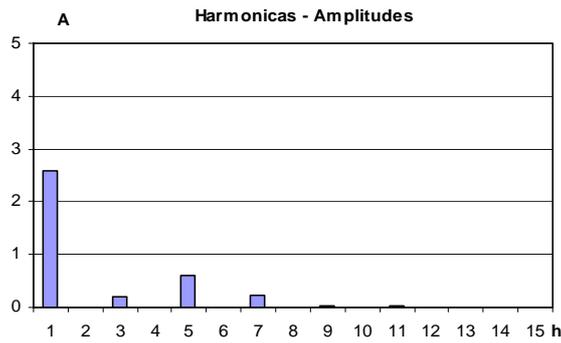
Linha C - filtro - experimental



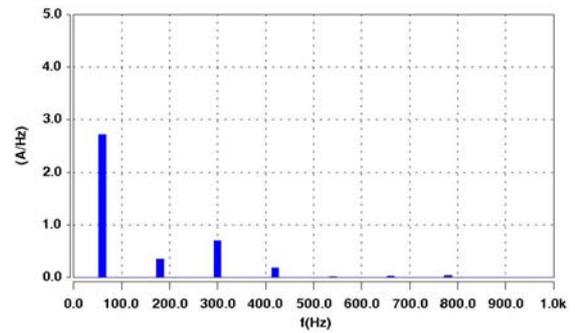
Linha C - filtro - computacional

Figura 5.40 - Formas de onda das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - tensão de suprimento reduzida - filtro de seqüência positiva e negativa

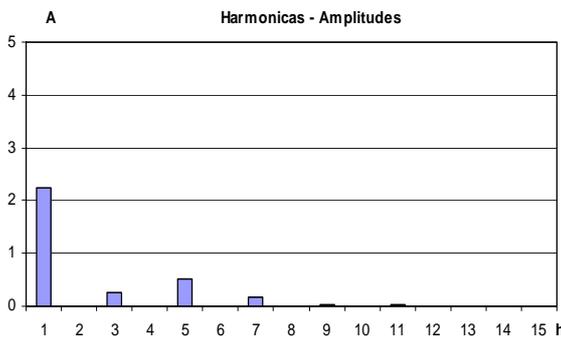
A figura 5.41 indica os correspondentes espectros harmônicos.



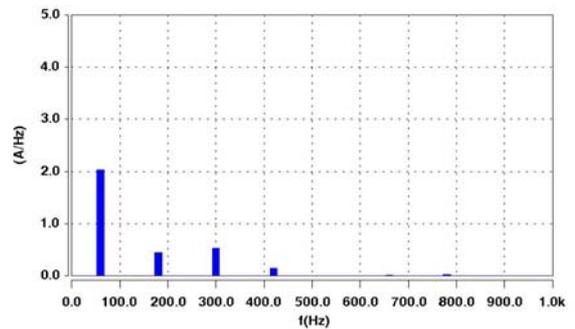
Linha A - filtro - experimental



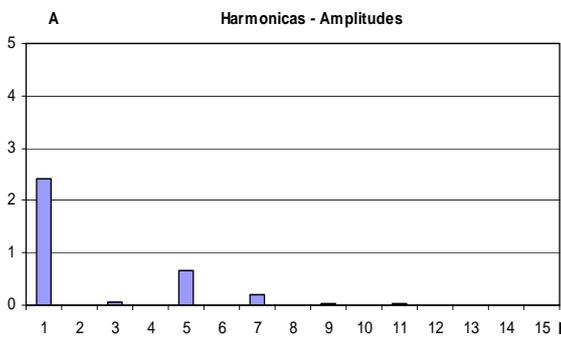
Linha A - filtro - computacional



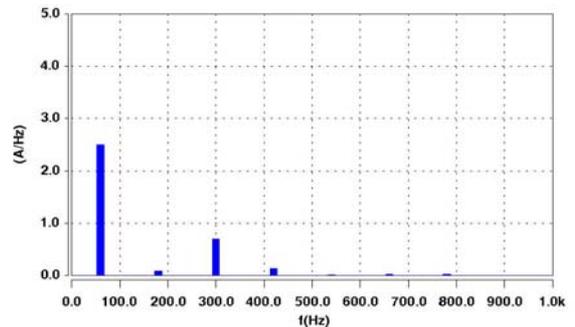
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



Linha C - filtro - experimental



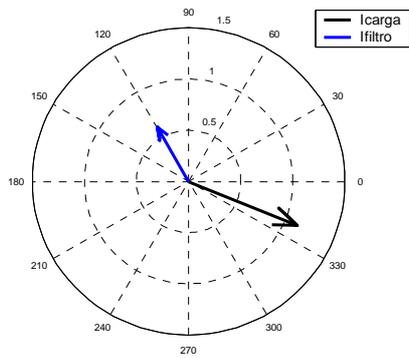
Linha C - filtro - computacional

Figura 5.41 - Espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - tensão de suprimento reduzida - filtro de seqüência positiva e negativa

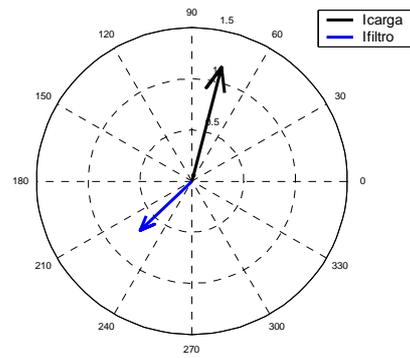
(d) Síntese dos resultados

Novamente, com o objetivo de prover meios para um maior entendimento do processo de filtragem desta metodologia e dos impactos atrelados com o fenômeno associado com o

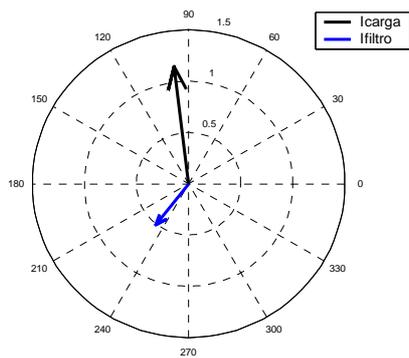
funcionamento sob condições reduzidas das tensões de suprimento, as figuras 5.42 e 5.43 apresentam os diagramas fasoriais para as correntes de 5ª e 7ª ordem para as correntes do filtro e da carga não-linear.



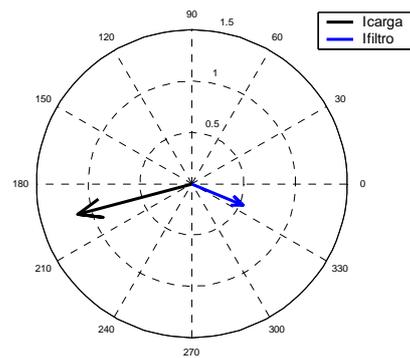
Linha A - experimental - 5ª ordem



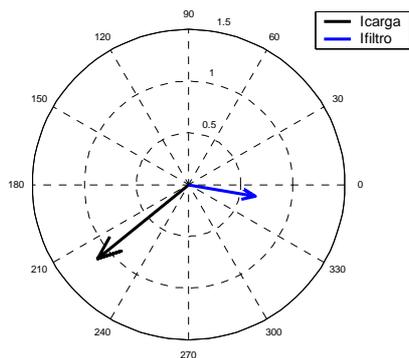
Linha A - computacional - 5ª ordem



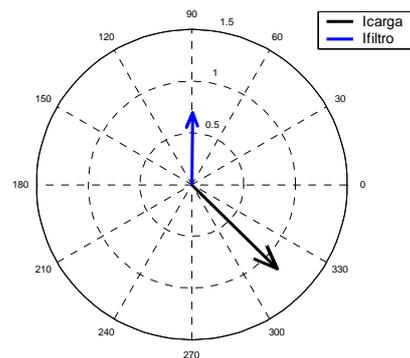
Linha B - experimental - 5ª ordem



Linha B - computacional - 5ª ordem

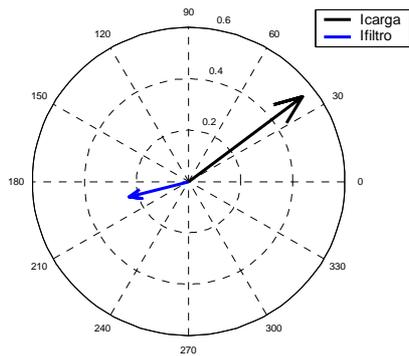


Linha C - experimental - 5ª ordem

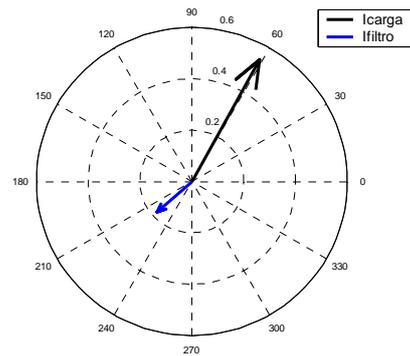


Linha C - computacional - 5ª ordem

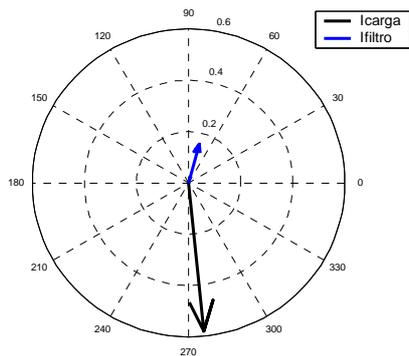
Figura 5.42 - Diagramas fasoriais das correntes de linha na carga e no filtro - experimental e computacional - tensão de suprimento reduzida - 5ª ordem - filtro de seqüência positiva e negativa



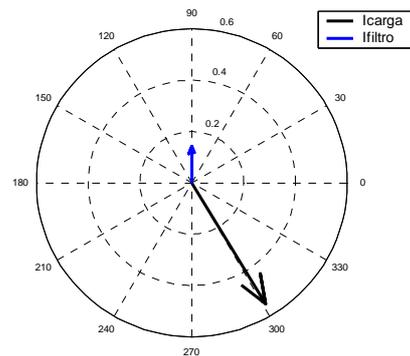
Linha A - experimental - 7ª ordem



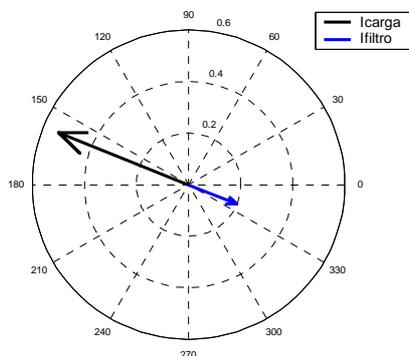
Linha A - computacional - 7ª ordem



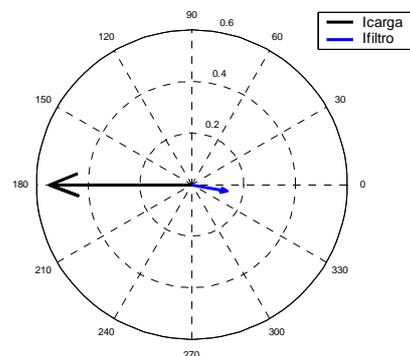
Linha B - experimental - 7ª ordem



Linha B - computacional - 7ª ordem



Linha C - experimental - 7ª ordem



Linha C - computacional - 7ª ordem

Figura 5.43 - Diagramas fasoriais das correntes de linha na carga e no filtro - experimental e computacional - tensão de suprimento reduzida - 7ª ordem - filtro de seqüência positiva e negativa

Tal como aconteceu para o caso anterior, observa-se uma forte influência do valor da tensão de suprimento senoidal no desempenho do filtro ora sob enfoque. Neste particular, é possível constatar as baixas correntes harmônicas oriundas do mesmo, justificadas através da baixa saturação, em decorrência da baixa tensão de suprimento. Novamente, a comparação

destes diagramas com aqueles oriundos das figuras 4.25 e 4.26 permitem ratificar as afirmativas anteriores.

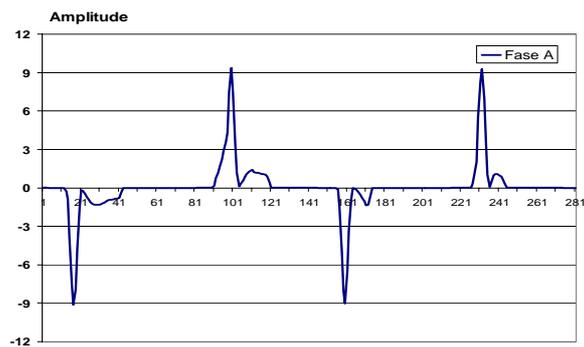
Caso b-3 - Carga não-linear desequilibrada

De modo a contemplar esta situação não-ideal, adotou-se uma nova composição para a carga, a qual passou a ser constituída por 3 unidades retificadoras distintas, cujas potências são: $S_A=370VA$, $S_B=470VA$ e $S_C=580VA$. Quanto às demais grandezas, estas foram restauradas aos valores empregados quando das investigações sob condições ideais de funcionamento do filtro. As figuras 5.44-5.49 apresentam os resultados para as correntes de linha registradas na carga não-linear, na alimentação e, por fim, no filtro de seqüência positiva e negativa. Como para os demais casos, ambos os desempenhos, experimental e computacional, são destacados.

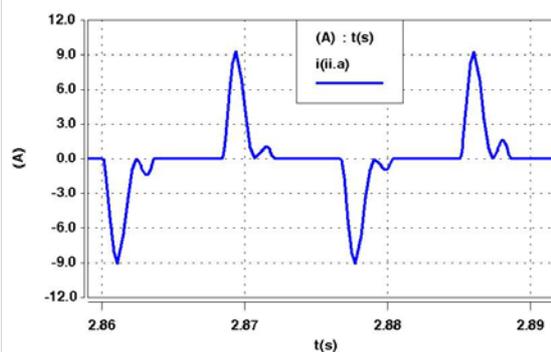
(a) Corrente na carga não-linear

A figura 5.44 apresenta, respectivamente, as correntes de linha A, B e C obtidas na carga não-linear.

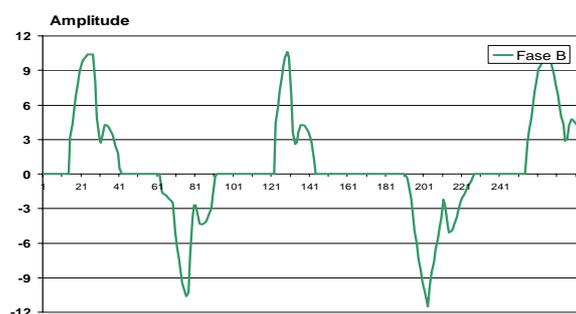
Complementarmente, a figura 5.45 fornece os correspondentes espectros de frequência para as correntes anteriores, novamente, em valores de pico.



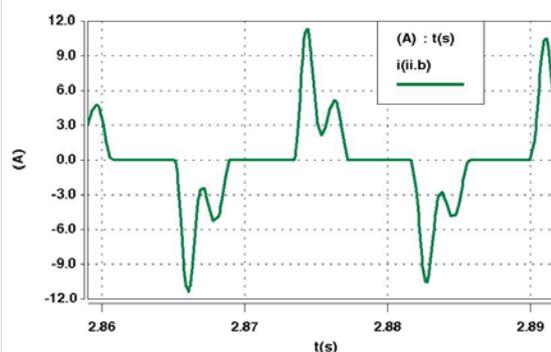
Linha A - carga não-linear - experimental



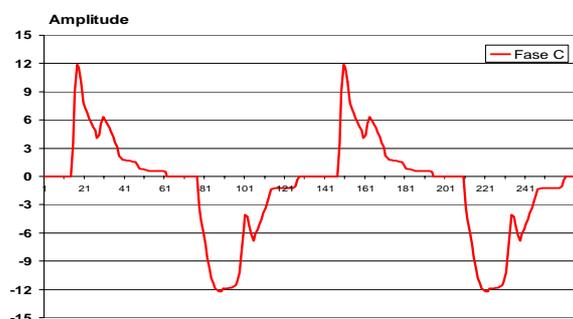
Linha A - carga não-linear - computacional



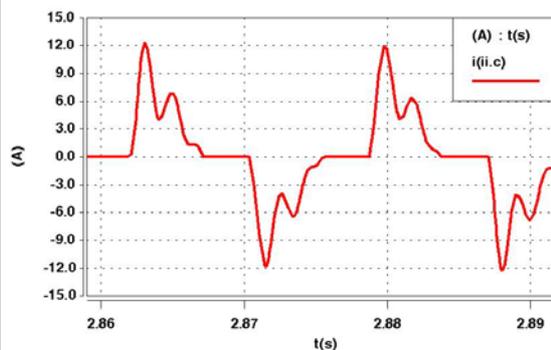
Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional

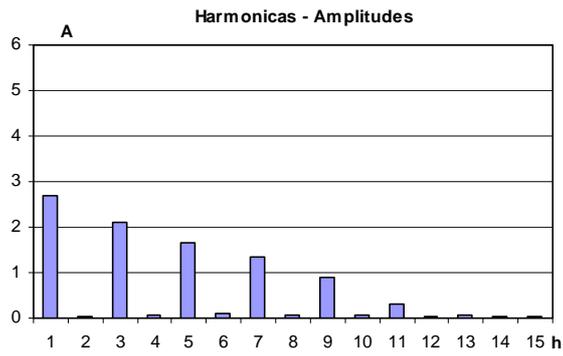


Linha C - carga não-linear - experimental

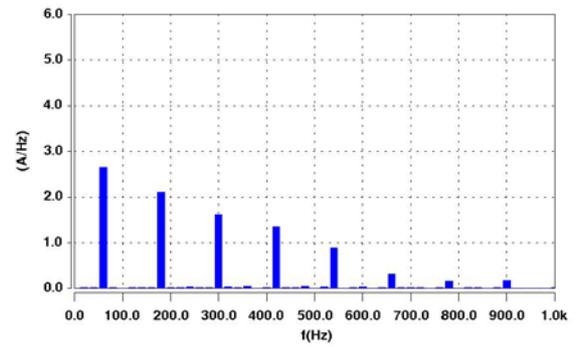


Linha C - carga não-linear - computacional

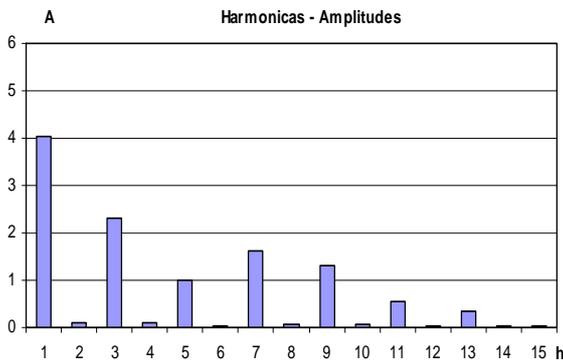
Figura 5.44 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência positiva e negativa



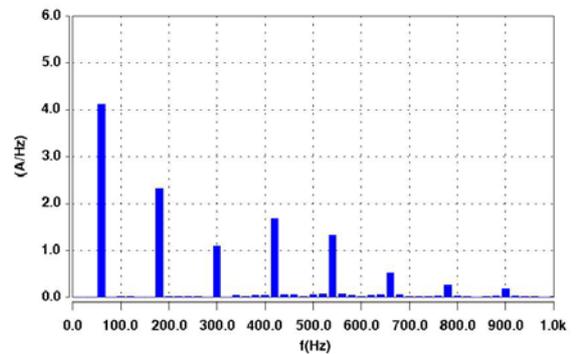
Linha A - carga não-linear - experimental



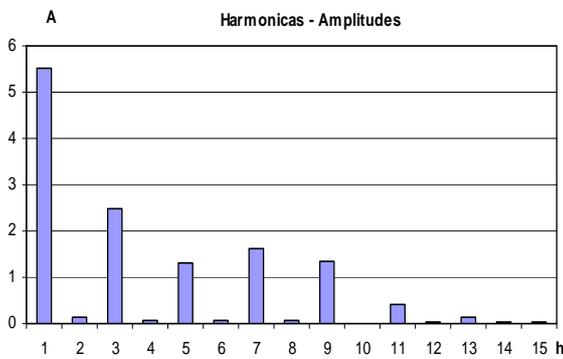
Linha A - carga não-linear - computacional



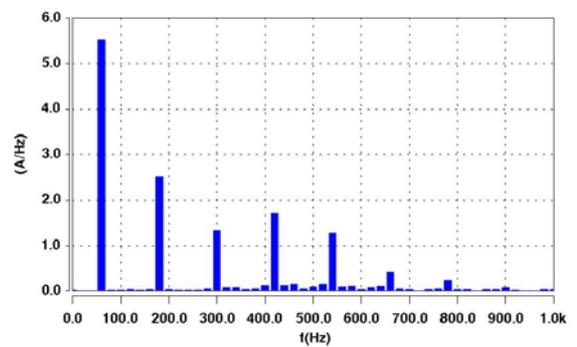
Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional



Linha C - carga não-linear - experimental

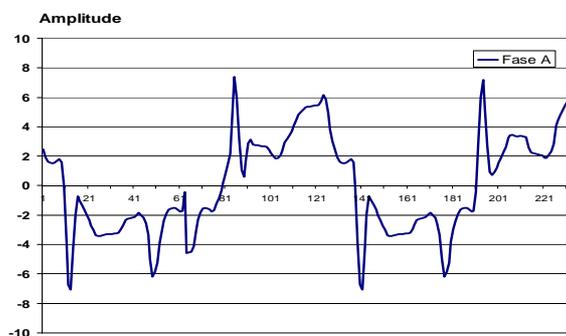


Linha C - carga não-linear - computacional

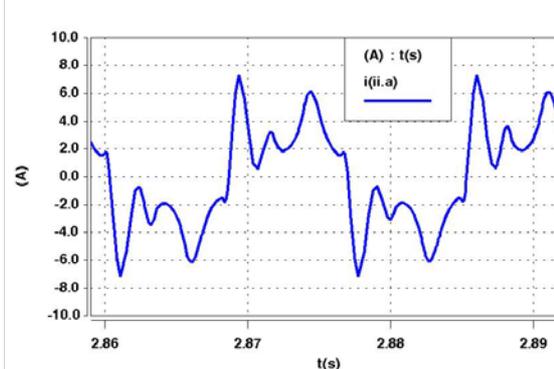
Figura 5.45 - Espectros harmônicos das correntes na carga não-linear - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência positiva e negativa

(b) Corrente de linha do alimentador

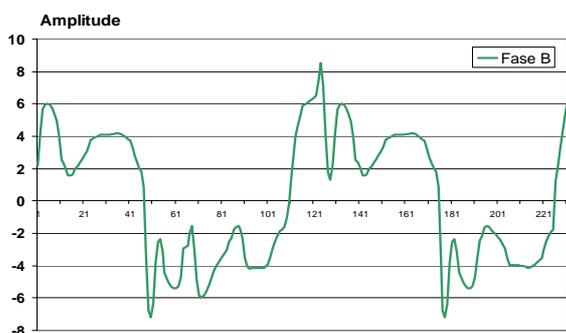
A figura 5.46 mostra, respectivamente, as correntes nas linhas A, B e C no alimentador.



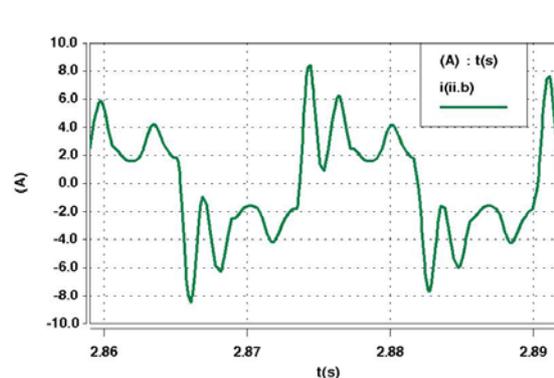
Linha A - alimentador - experimental



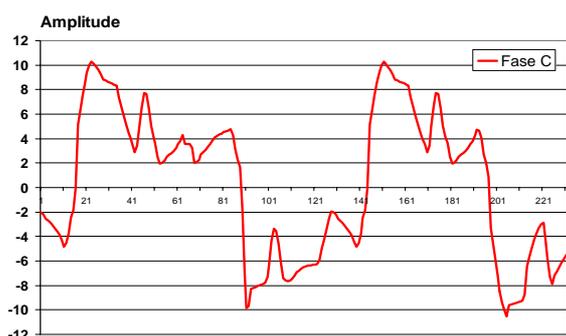
Linha A - alimentador - computacional



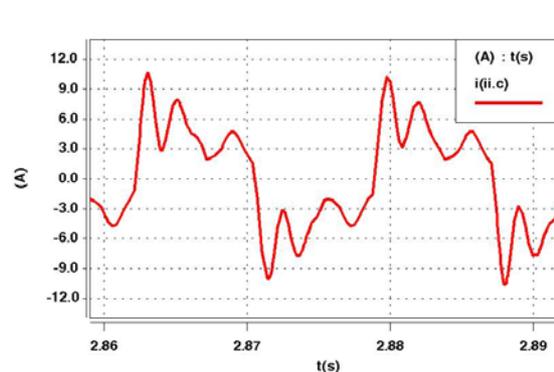
Linha B - alimentador - experimental



Linha B - alimentador - computacional



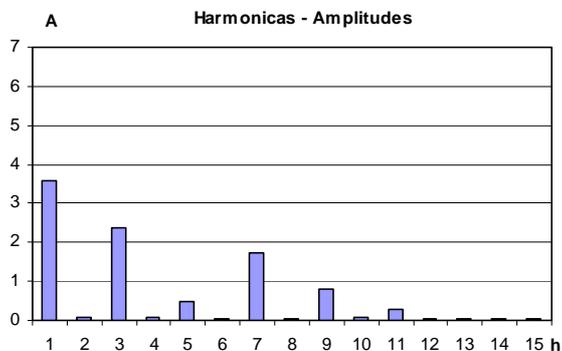
Linha C - alimentador - experimental



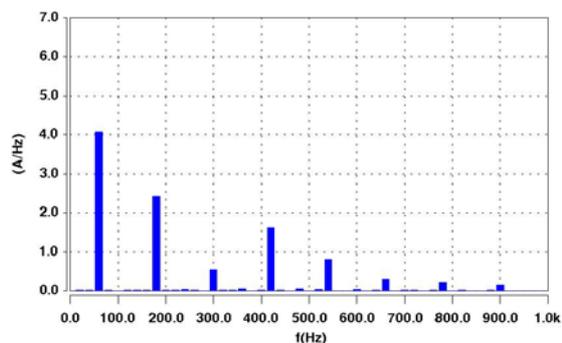
Linha C - alimentador - computacional

Figura 5.46 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência positiva e negativa

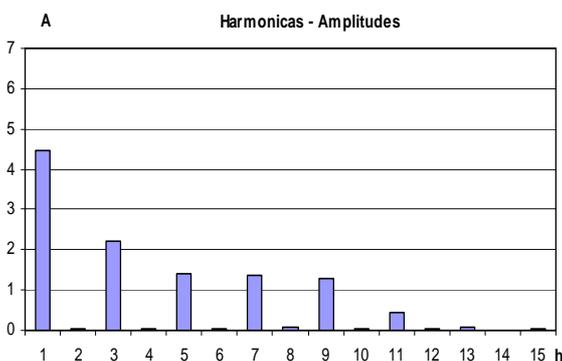
De modo análogo aos casos anteriores, a figura 5.47 é indicativa dos espectros harmônicos das correntes na alimentação.



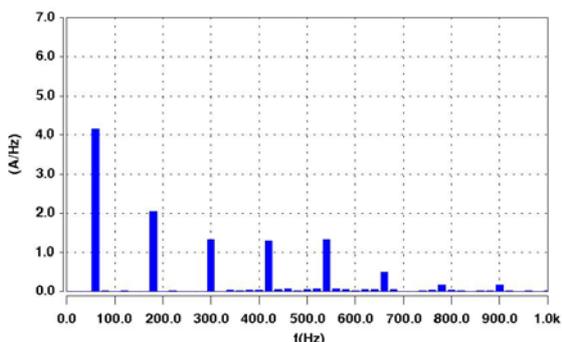
Linha A - alimentador - experimental



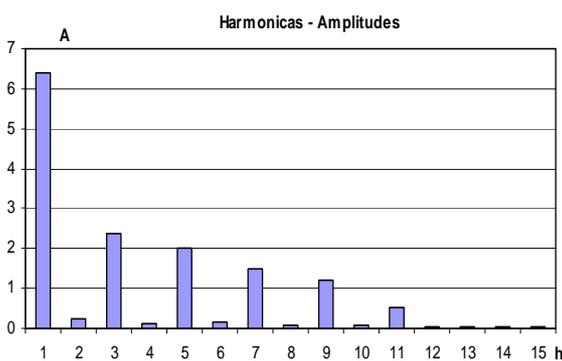
Linha A - alimentador - computacional



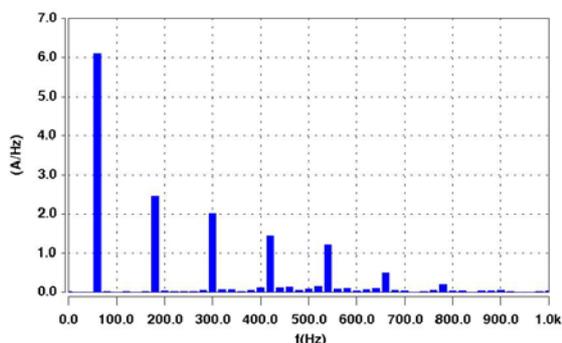
Linha B - alimentador - experimental



Linha B - alimentador - computacional



Linha C - alimentador - experimental

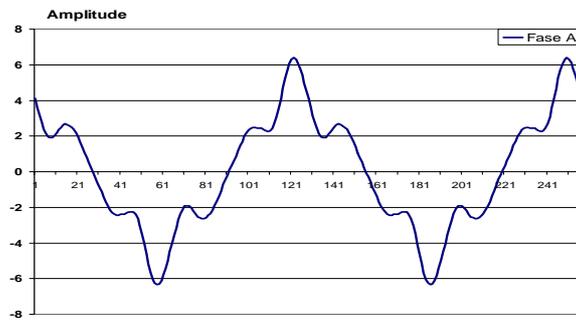


Linha C - alimentador - computacional

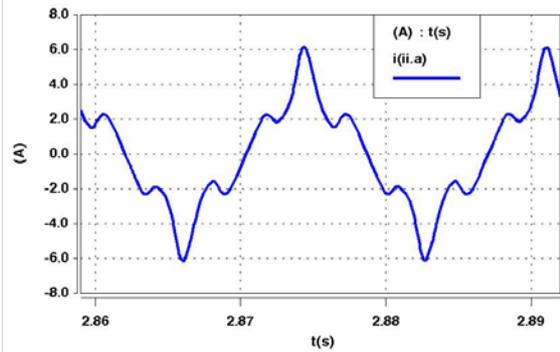
Figura 5.47 - Espectros harmônicos das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência positiva e negativa

(c) Corrente de linha no filtro de seqüência positiva e negativa

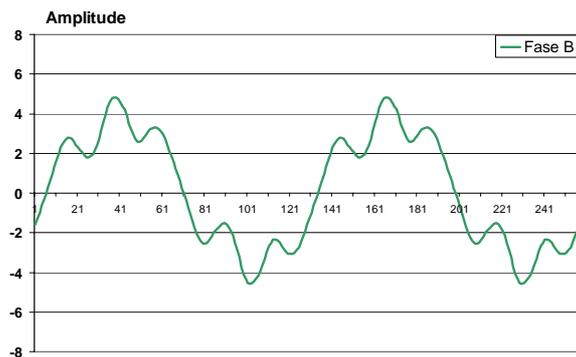
Por fim, a figura 5.48 fornece, respectivamente, as correntes de linha A, B e C do filtro eletromagnético.



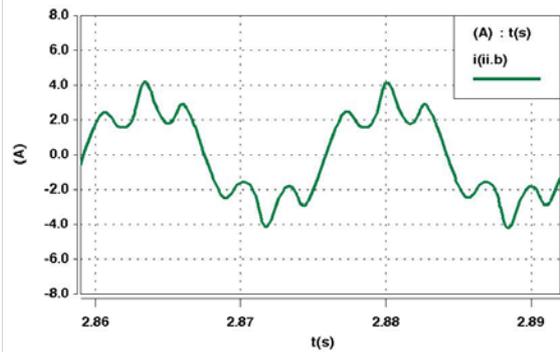
Linha A - filtro - experimental



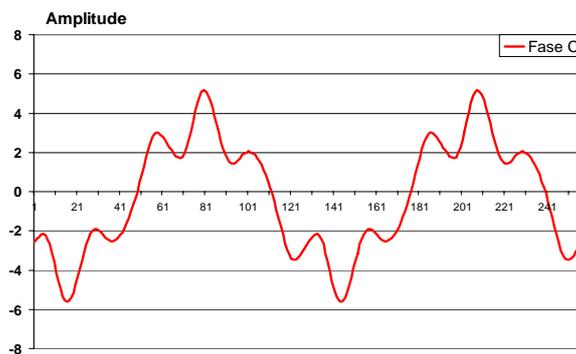
Linha A - filtro - computacional



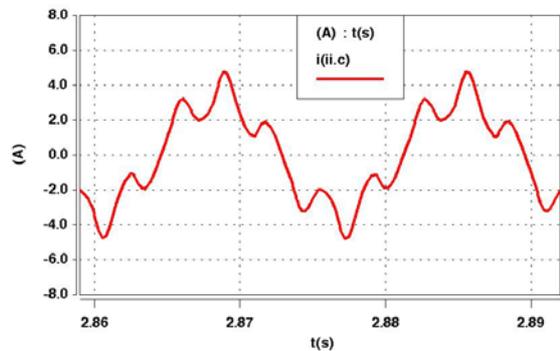
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



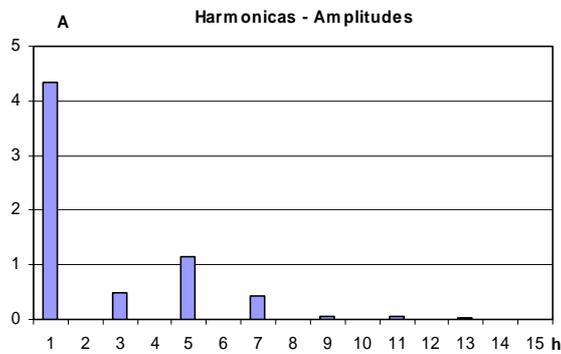
Linha C - filtro - experimental



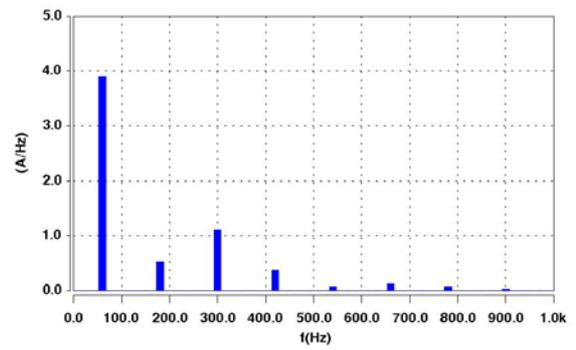
Linha C - filtro - computacional

Figura 5.48 - Formas de onda das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência positiva e negativa

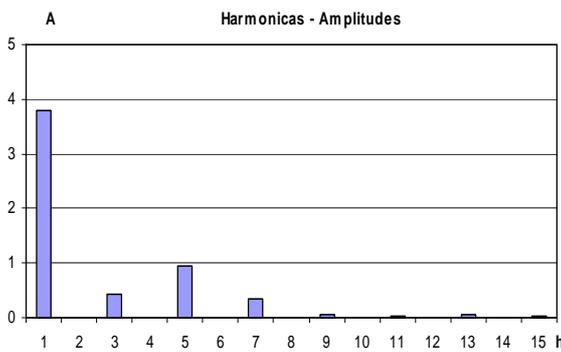
A figura 5.49 indica os correspondentes espectros harmônicos.



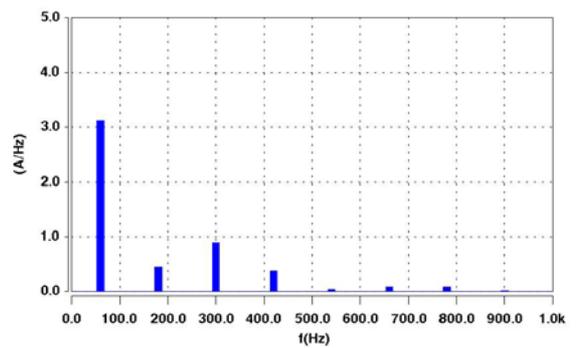
Linha A - filtro - experimental



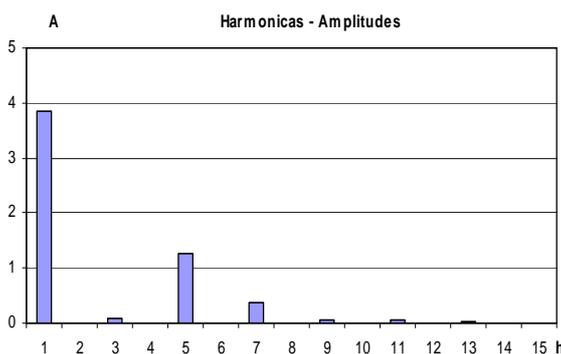
Linha A - filtro - computacional



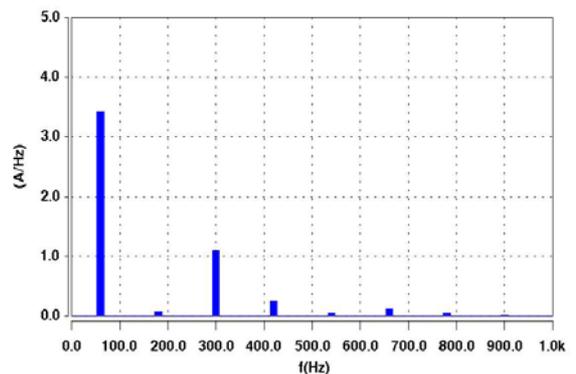
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



Linha C - filtro - experimental

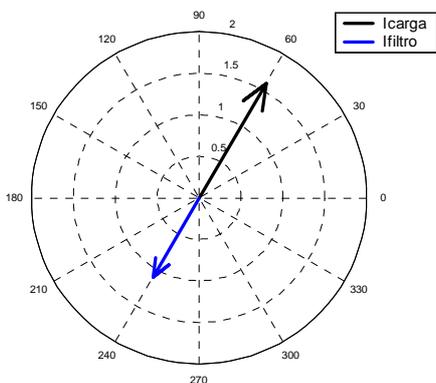


Linha C - filtro - computacional

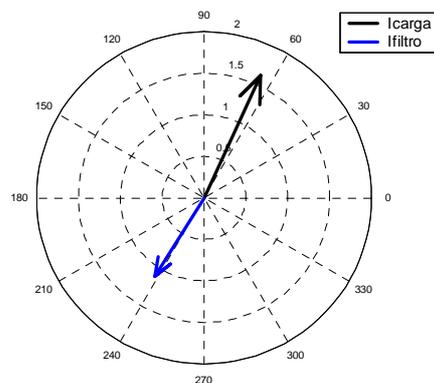
Figura 5.49 - Espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência positiva e negativa

(d) Síntese dos resultados

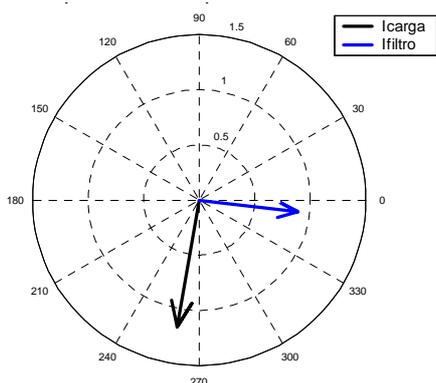
As figuras 5.50 e 5.51 apresentam os diagramas fasoriais das componentes de 5ª e 7ª ordens para a carga e filtro eletromagnético.



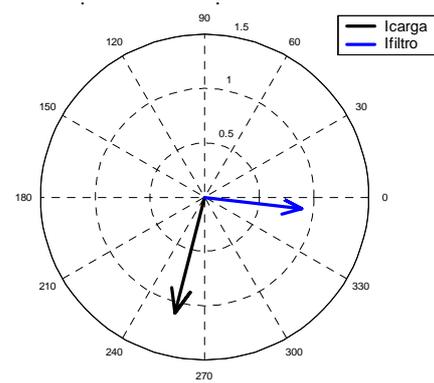
Linha A - experimental - 5ª ordem



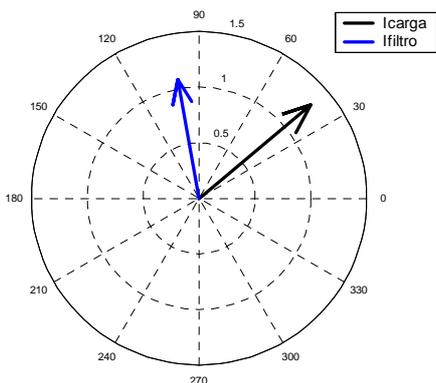
Linha A - computacional - 5ª ordem



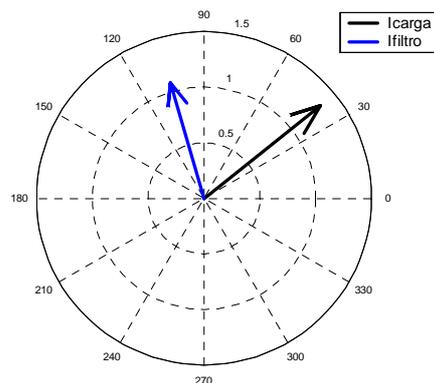
Linha B - experimental - 5ª ordem



Linha B - computacional - 5ª ordem

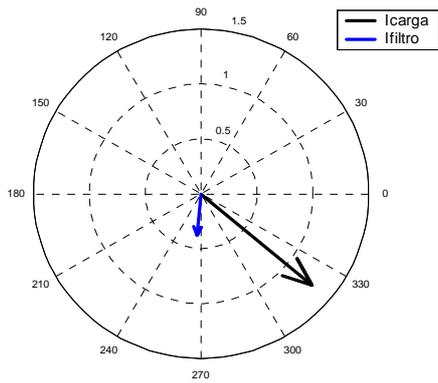


Linha C - experimental - 5ª ordem

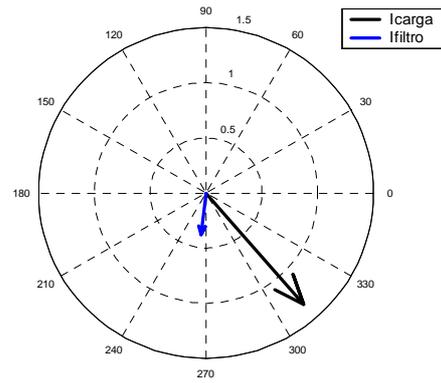


Linha C - computacional - 5ª ordem

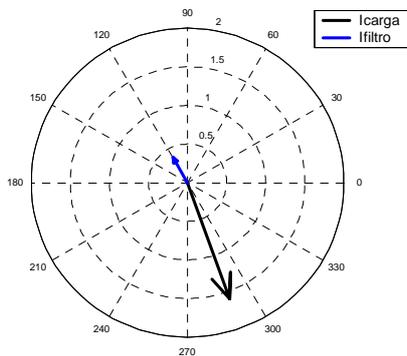
Figura 5.50 - Diagramas fasoriais das correntes de linha na carga e no filtro - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - 5ª ordem - filtro de seqüência positiva e negativa



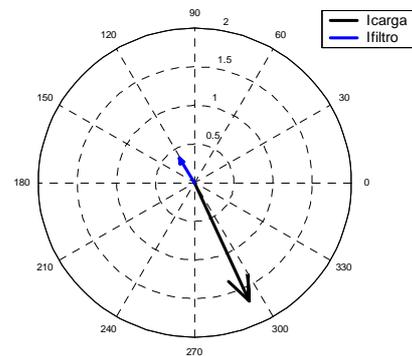
Linha A - experimental - 7ª ordem



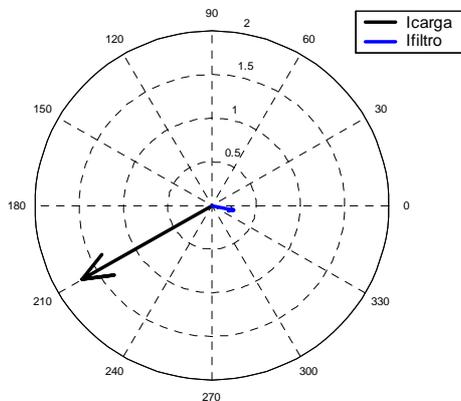
Linha A - computacional - 7ª ordem



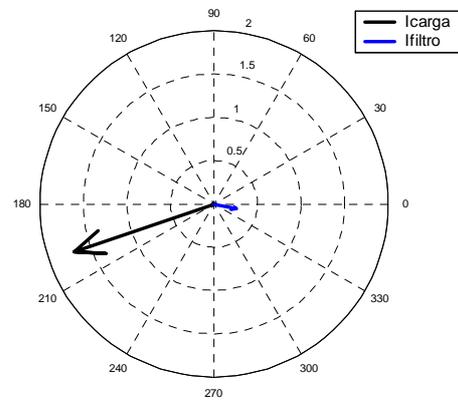
Linha B - experimental - 7ª ordem



Linha B - computacional - 7ª ordem



Linha C - experimental - 7ª ordem



Linha C - computacional - 7ª ordem

Figura 5.51 - Diagramas fasoriais das correntes de linha na carga e no filtro - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - 7ª ordem - filtro de seqüência positiva e negativa

Os diagramas evidenciam que a operação da carga não-linear, de forma desequilibrada, tal como especificada, apresenta-se com um conteúdo harmônico de 5ª e 7ª ordens com valores bastante distintos daqueles observados quando da carga equilibrada. Esta situação é

decisiva para prejudicar o processo de filtragem destas componentes harmônicas. Neste sentido, fica constatado que o conhecimento das condições operativas do filtro sob a ação de uma carga desequilibrada também se constitui em fator relevante e que afeta substancialmente a eficácia desta metodologia de filtragem.

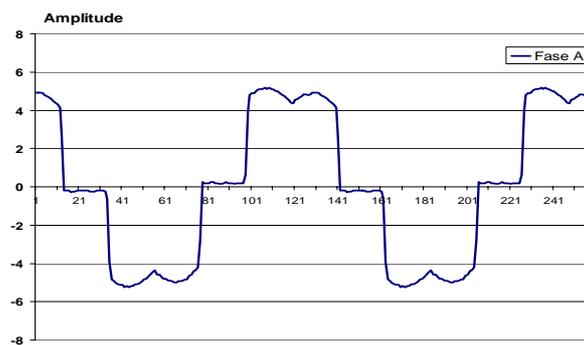
Caso b-4 - Exclusão dos resistores defasadores

Para fins da avaliação da importância dos resistores defasadores no processo da compensação aqui considerada, esta seção encontra-se direcionada aos estudos avaliativos do desempenho do filtro sob condições extremas em que as mencionadas resistências foram totalmente eliminadas do circuito.

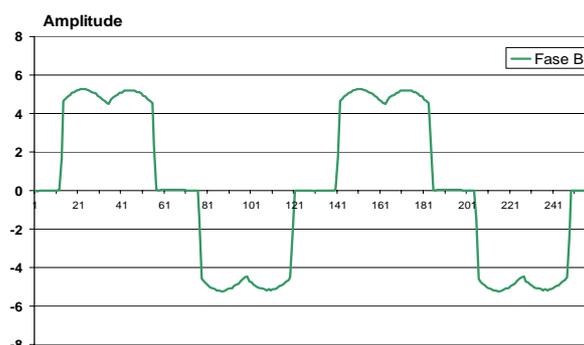
Dentro do exposto, mantendo-se as condições operacionais estabelecidas no processo de validação do capítulo anterior, e promovendo-se, desta vez, a anulação dos resistores conectados em série com o filtro, obteve-se, para os estudos computacionais e experimentais, os resultados constantes nas figuras 5.52-5.59.

(a) Corrente na carga não-linear

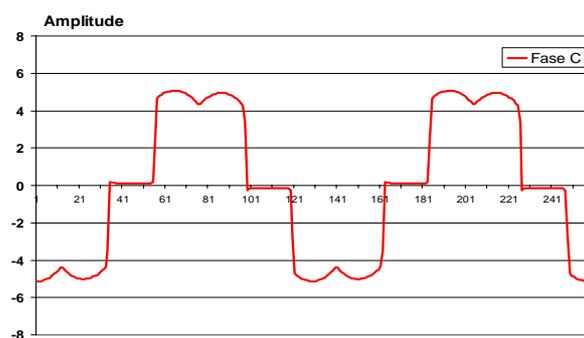
A figura 5.52 apresenta, respectivamente, as correntes de linha A, B e C obtidas na carga não-linear.



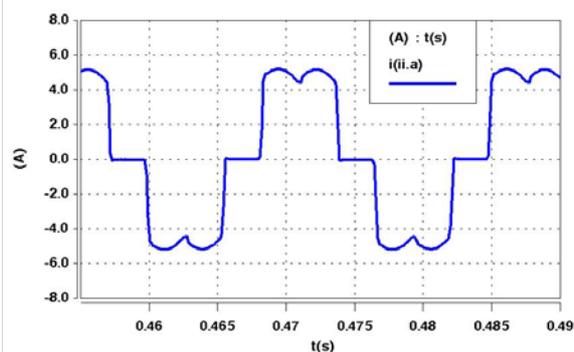
Linha A - carga não-linear - experimental



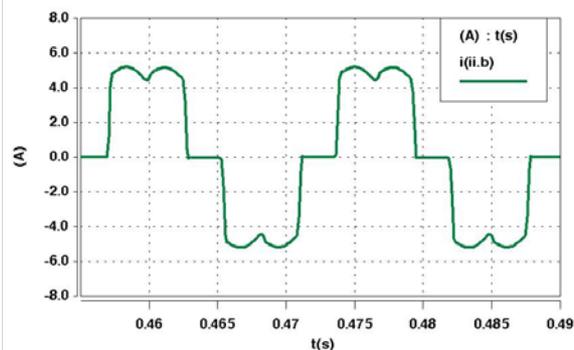
Linha B - carga não-linear - experimental



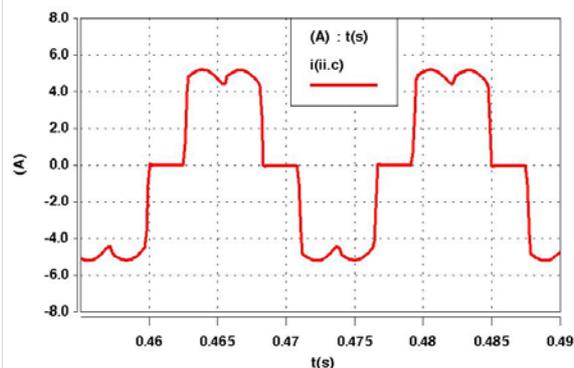
Linha C - carga não-linear - experimental



Linha A - carga não-linear - computacional



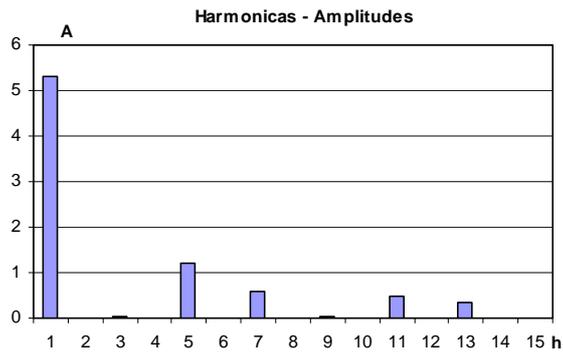
Linha B - carga não-linear - computacional



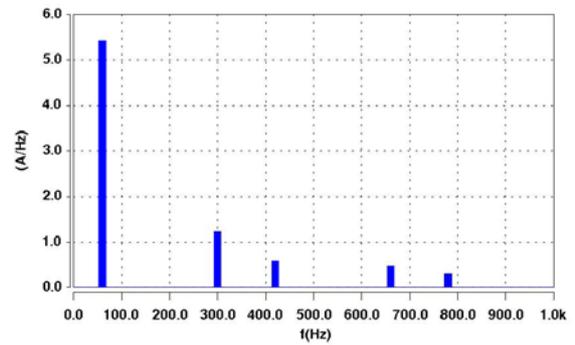
Linha C - carga não-linear - computacional

Figura 5.52 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - resistores defasadores nulos - filtro de seqüência positiva e negativa

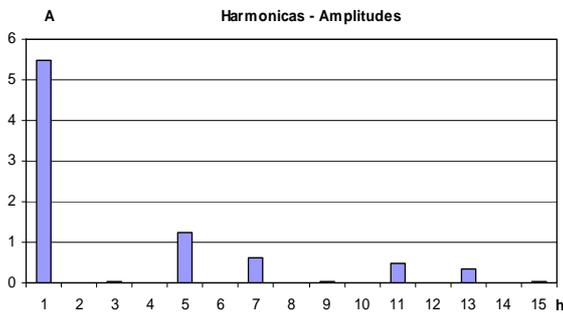
A figura 5.53 fornece os correspondentes espectros de frequência para as correntes anteriores.



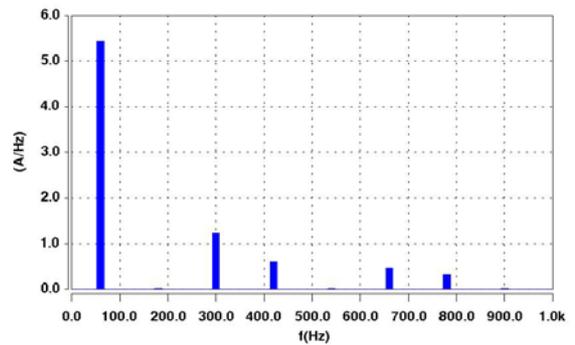
Linha A - carga não-linear - experimental



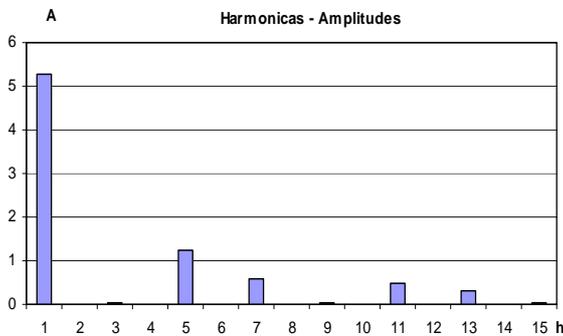
Linha A - carga não-linear - computacional



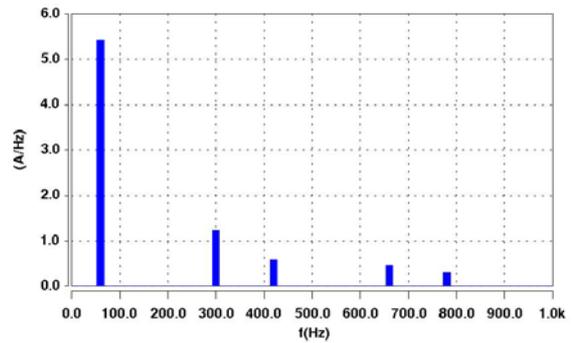
Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional



Linha C - carga não-linear - experimental

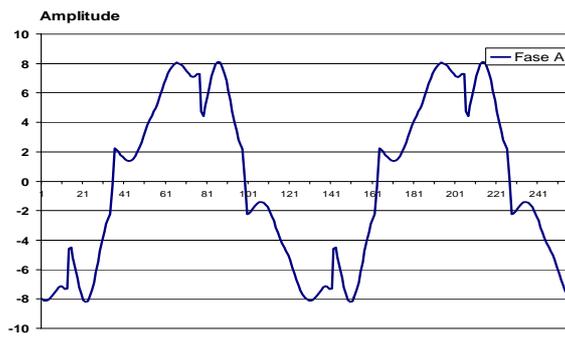


Linha C - carga não-linear - computacional

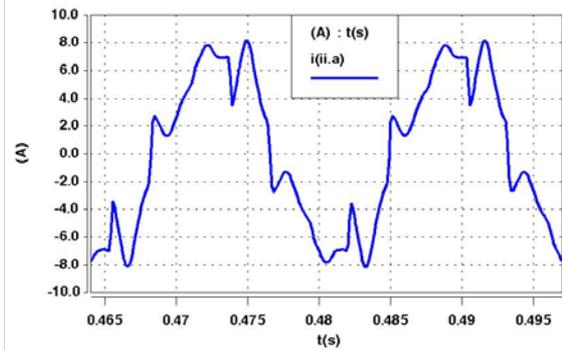
Figura 5.53 - Espectros harmônicos das correntes na carga não-linear - experimental e computacional - resistores defasadores nulos - filtro de seqüência positiva e negativa

(b) Corrente de linha do alimentador

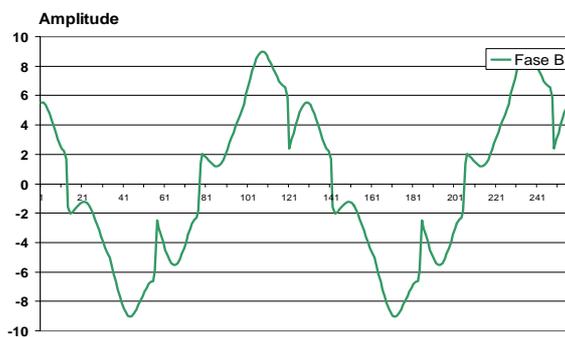
A figura 5.54 mostra, respectivamente, as correntes experimentais e computacionais para as linhas A, B e C do alimentador.



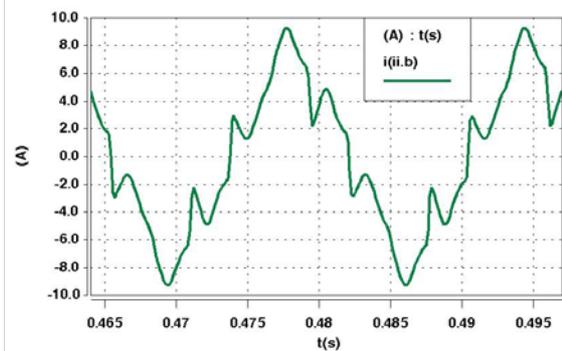
Linha A - alimentador - experimental



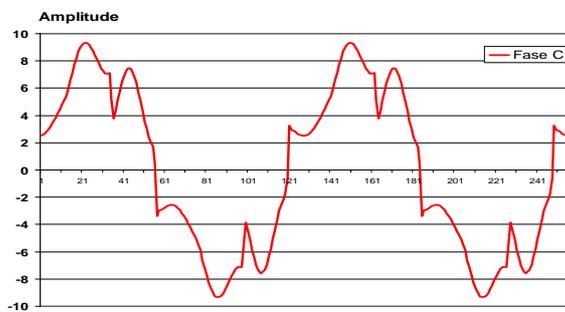
Linha A - alimentador - computacional



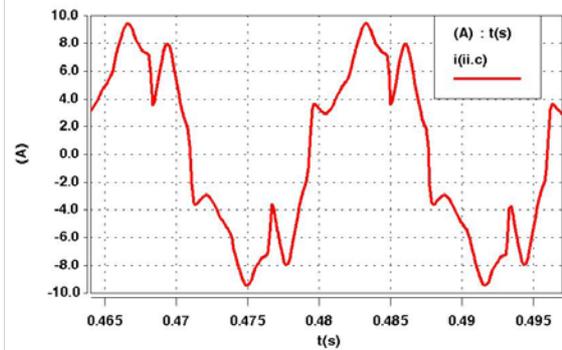
Linha B - alimentador - experimental



Linha B - alimentador - computacional



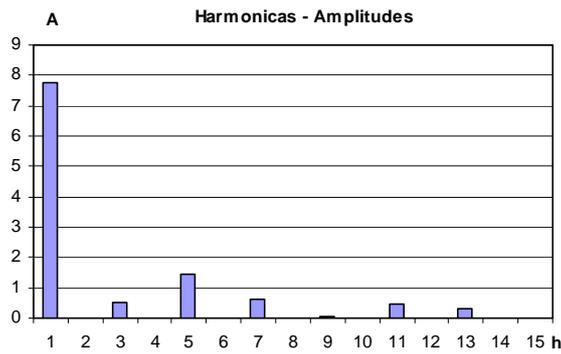
Linha C - alimentador - experimental



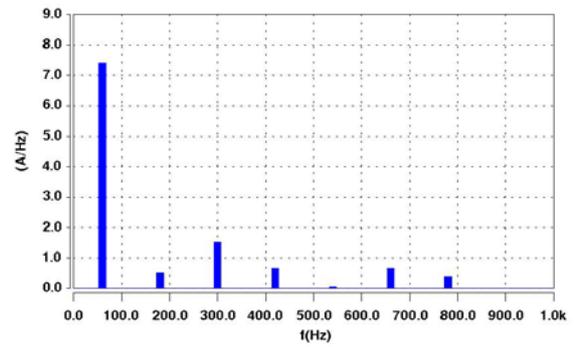
Linha C - alimentador - computacional

Figura 5.54 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - resistores defasadores nulos - filtro de seqüência positiva e negativa

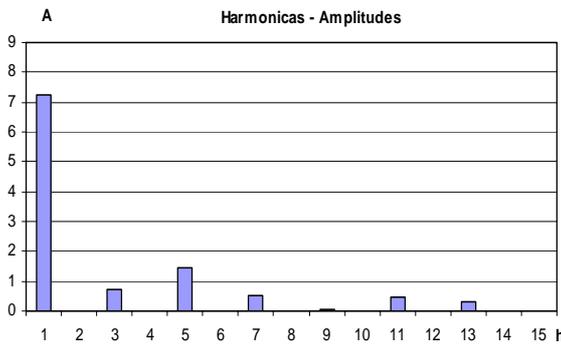
De modo análogo aos casos anteriores, a figura 5.55 é indicativa dos espectros harmônicos das correntes na alimentação.



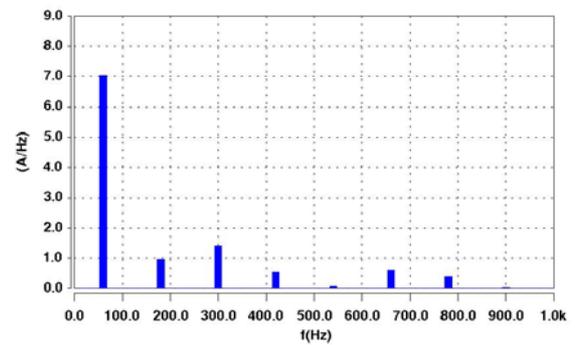
Linha A - alimentador - experimental



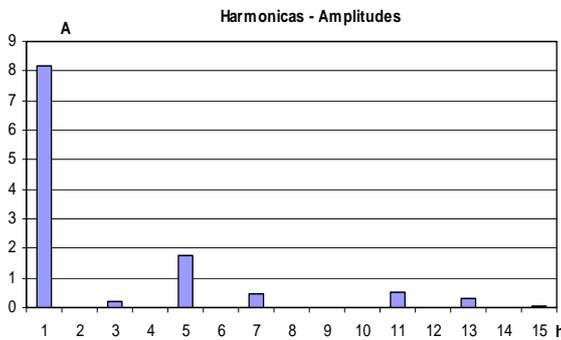
Linha A - alimentador - computacional



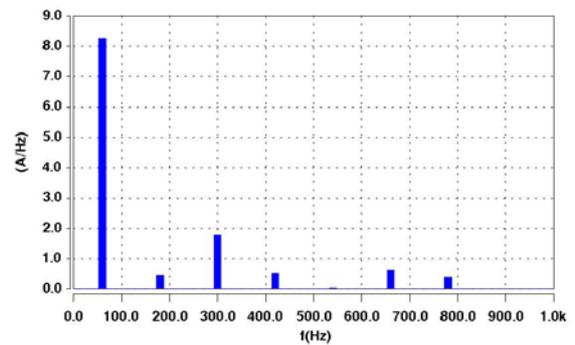
Linha B - alimentador - experimental



Linha B - alimentador - computacional



Linha C - alimentador - experimental

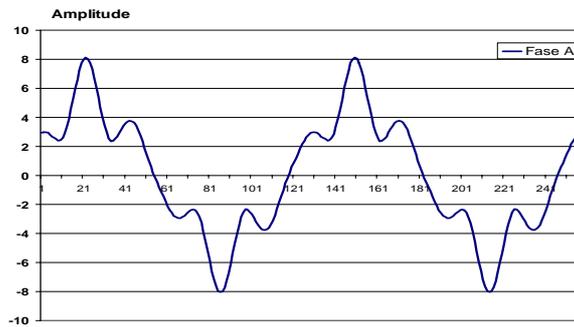


Linha C - alimentador - computacional

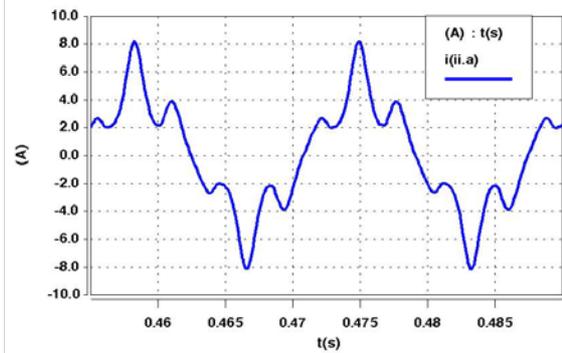
Figura 5.55 - Espectros harmônicos das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - resistores defasadores nulos - filtro de seqüência positiva e negativa

(c) Corrente de linha no filtro de seqüência positiva e negativa

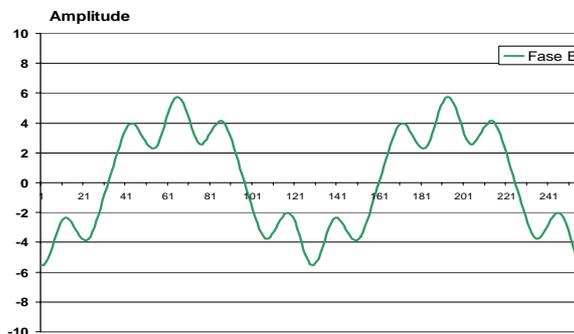
Por fim, a figura 5.56 fornece, respectivamente, as correntes de linha A, B e C do filtro eletromagnético.



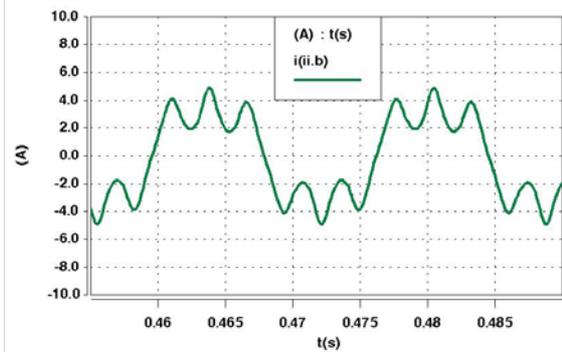
Linha A - filtro - experimental



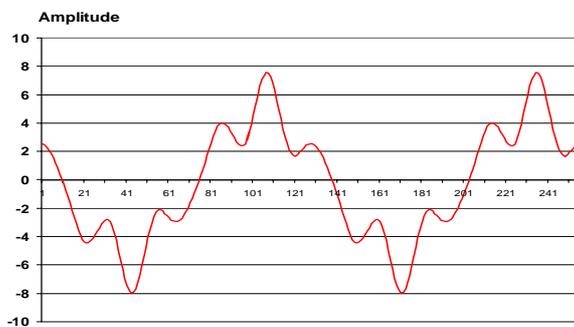
Linha A - filtro - computacional



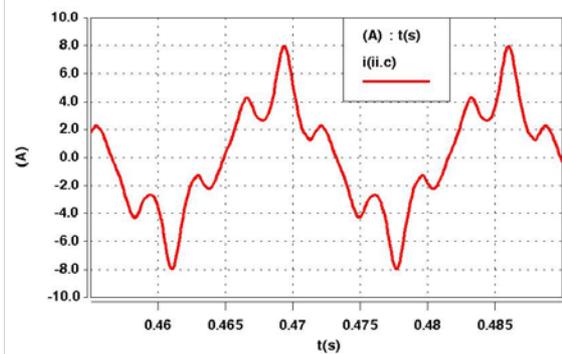
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



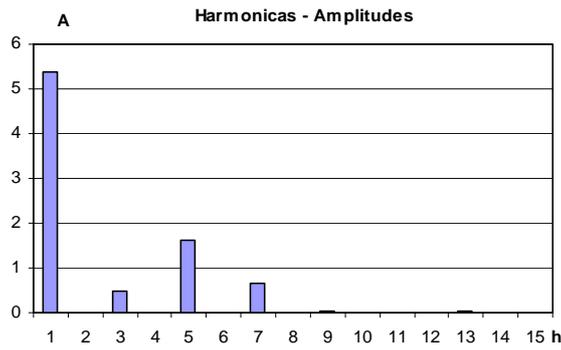
Linha C - filtro - experimental



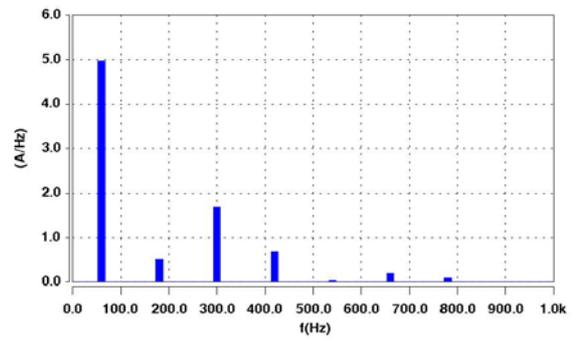
Linha C - filtro - computacional

Figura 5.56 - Formas de onda das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - resistores defasadores nulos - filtro de seqüência positiva e negativa

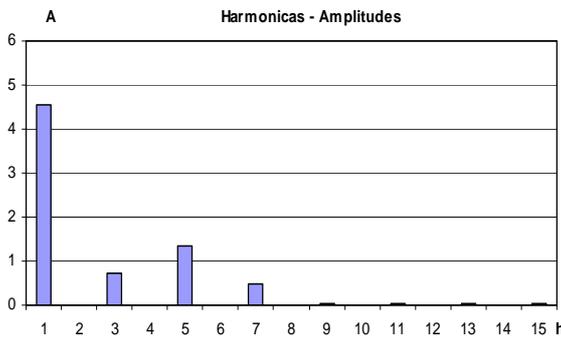
A figura 5.57 indica os correspondentes espectros harmônicos.



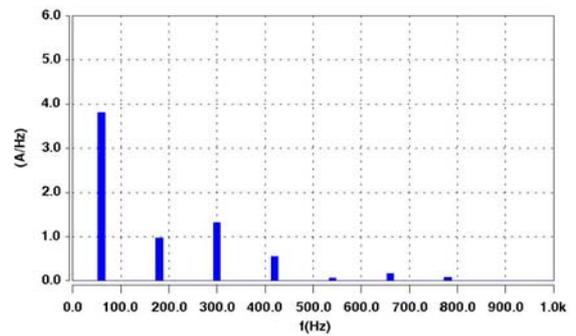
Linha A - filtro - experimental



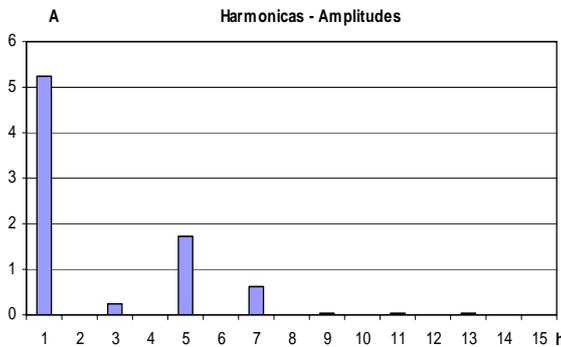
Linha A - filtro - computacional



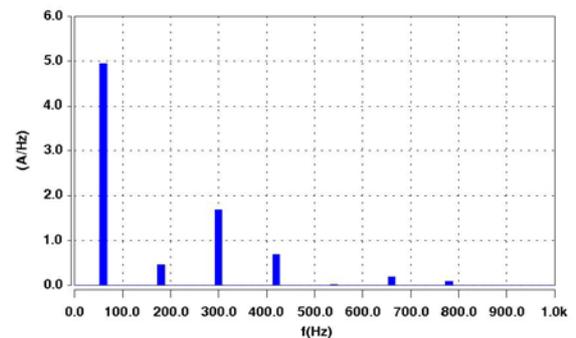
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



Linha C - filtro - experimental

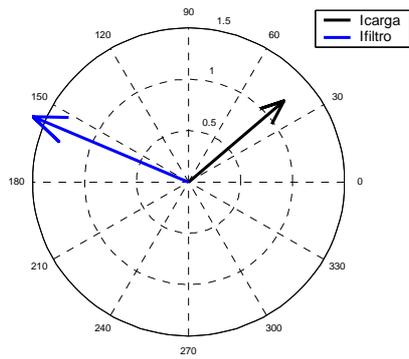


Linha C - filtro - computacional

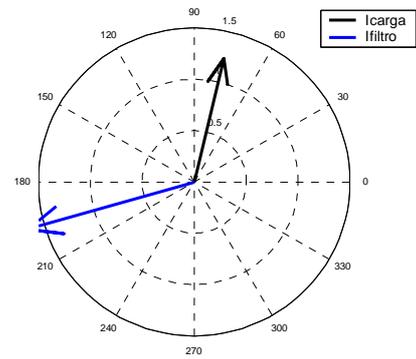
Figura 5.57 - Espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - resistores defasadores nulos - filtro de seqüência positiva e negativa

(d) Síntese dos resultados

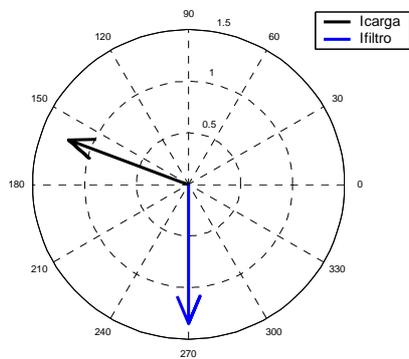
Tal como para os casos anteriores, as figuras 5.58 e 5.59 apresentam os diagramas fasoriais para as correntes de 5ª e 7ª ordens da carga não-linear e filtro.



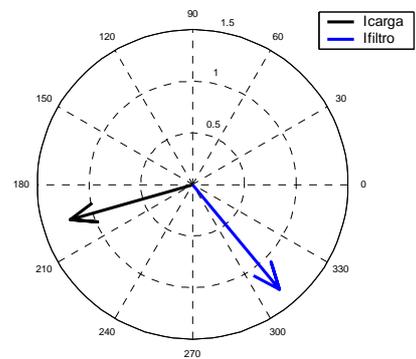
Linha A - experimental - 5ª ordem



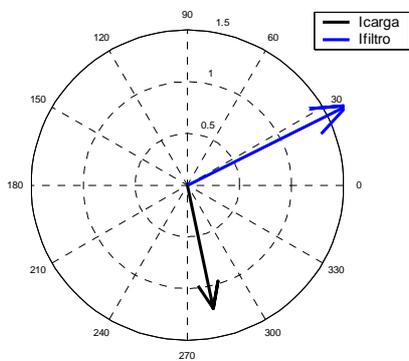
Linha A - computacional - 5ª ordem



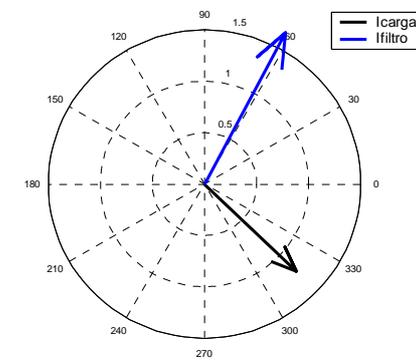
Linha B - experimental - 5ª ordem



Linha B - computacional - 5ª ordem

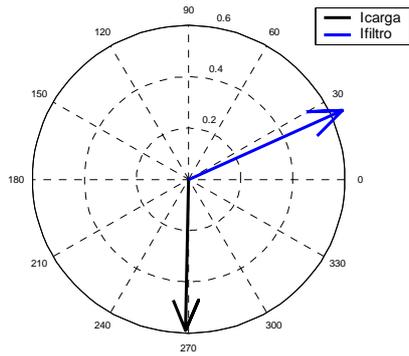


Linha C - experimental - 5ª ordem

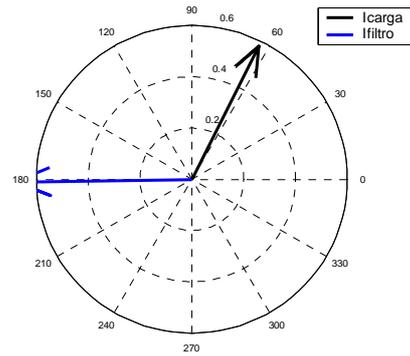


Linha C - computacional - 5ª ordem

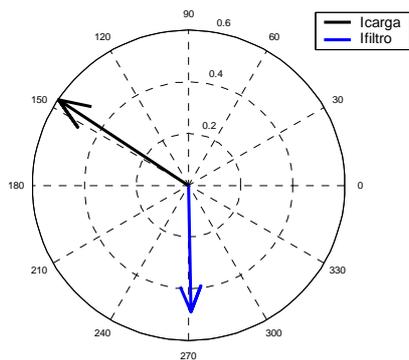
Figura 5.58 - Diagramas fasoriais das correntes de linha na carga e no filtro - experimental e computacional - resistores defasadores nulos - 5ª ordem - filtro de seqüência positiva e negativa



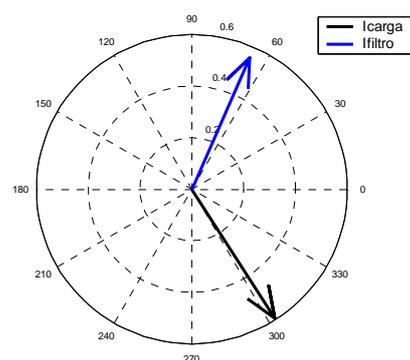
Linha A - experimental - 7ª ordem



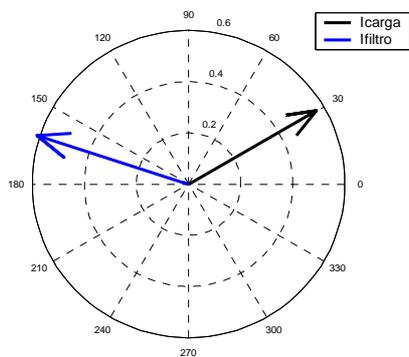
Linha A - computacional - 7ª ordem



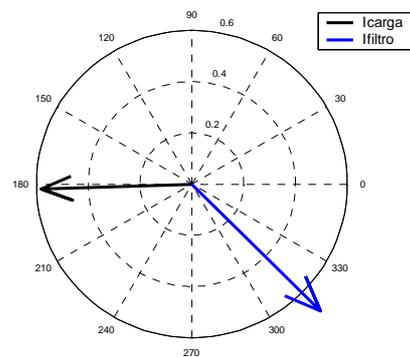
Linha B - experimental - 7ª ordem



Linha B - computacional - 7ª ordem



Linha C - experimental - 7ª ordem



Linha C - computacional - 7ª ordem

Figura 5.59 - Diagramas fasoriais das correntes de linha na carga e no filtro - experimental e computacional - resistores defasadores nulos - 7ª ordem - filtro de seqüência positiva e negativa

Os resultados evidenciam maiores correntes de 5ª e 7ª ordens geradas pelo filtro eletromagnético, em virtude de uma saturação mais acentuada no mesmo. Outro aspecto interessante a ser observado refere-se aos ângulos de fase destes fasores, que perdem sua propriedade de compensação através de um processo de rotação que os afasta da oposição de

fases almejada. Novamente, as análises se tornam mais claras quando da inspeção dos diagramas das figuras 4.25 e 4.26.

5.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo, centrado nos fatores de influência nos desempenhos dos produtos propostos nesta pesquisa, contemplou os seguintes pontos:

- Caracterização dos casos considerados nas investigações computacionais e experimentais, os quais contemplam os desvios das condições ideais mais comumente detectados nas redes e equipamentos elétricos. A seleção das situações investigadas fundamentou-se na avaliação do desempenho dos filtros sob a ação de situações práticas frequentemente encontradas nas redes elétricas;
- Apresentação e discussão dos resultados experimentais e computacionais para as correntes de linha para as distintas partes que perfazem o complexo elétrico investigado. Nestes termos, além dos esclarecimentos associados com os níveis de interferência que os desvios produzem nos filtros, fica também estabelecido um procedimento complementar para o processo de validação dos modelos estabelecidos.

Dentro do exposto, segue que o presente capítulo ofereceu as seguintes contribuições:

- Avaliação dos fatores de influência no desempenho dos filtros eletromagnéticos de seqüência zero e de seqüência positiva e negativa, sob condições operacionais não-ideais, abordando alterações no sistema de suprimento, na carga não-linear e, por fim, nos filtros sob enfoque. Os estudos contemplaram ensaios laboratoriais e

simulações computacionais e almejavam esclarecer sobre a necessidade de medidas orientativas para os projetos dos produtos aqui focados, em particular no que tange às questões de aquecimento para o filtro de seqüência zero;

- Estabelecimento de termos comparativos entre os desempenhos dos modelos computacionais frente aos experimentais, proporcionando, assim, um mecanismo complementar para a validação das propostas feitas nesta pesquisa;
- Evidenciar que algumas situações não-ideais de funcionamento podem fortemente comprometer a eficiência do processo aqui investigado.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES FINAIS

Embora cada capítulo tenha apresentado suas conclusões e comentários específicos sobre os assuntos enfocados, considera-se, neste momento, fundamental uma abordagem global dos trabalhos desenvolvidos e resultados atingidos. Isto proporciona uma visão ampla, rápida e sucinta das investigações como um todo.

Para tanto, nesta etapa procede-se a uma consolidação das constatações parciais emitidas ao final de cada capítulo, somadas, ainda, a outros aspectos considerados relevantes para um melhor entendimento sobre as contribuições decorrentes da pesquisa. Focando, pois estas premissas:

- O capítulo I objetivou oferecer uma abordagem sobre a área da Qualidade da Energia Elétrica, com destaque às distorções harmônicas e os mecanismos voltados para a mitigação deste fenômeno. Neste contexto, procedeu-se uma revisão bibliográfica sobre o tema filtros harmônicos e, em especial, sobre os equipamentos destinados à filtragem através de dispositivos eletromagnéticos. Este trabalho culminou por evidenciar que o tema de concentração desta pesquisa e as lacunas ainda existentes neste tópico específico ofereceriam desafios atrativos e promissores para uma pesquisa no porte aqui desejada. Por fim, foram estabelecidos os objetivos gerais deste trabalho de doutorado e apresentada a estrutura geral da tese;

- A segunda unidade desta tese primou pela proposição dos princípios operacionais que nortearam o processo da compensação harmônica através de dispositivos eletromagnéticos. Além das concepções físicas, foram também estabelecidos os embasamentos matemáticos para os dois tipos de filtros harmônicos eletromagnéticos, visando posteriores modelagens e implementações computacionais. Neste particular, deve-se ressaltar que as propostas de modelagem consistiriam em contribuições originais e efetivamente apropriadas aos fins aqui almejados;
- Na continuidade, o capítulo III foi concentrado na identificação das unidades físicas constituintes dos filtros, escolha da metodologia mais apropriada para fins da modelagem computacional dos dispositivos e as respectivas implementações na base computacional selecionada. A opção final recaiu na representação dos equipamentos na forma de relutâncias magnéticas e forças magnetomotrizes nos termos determinados pelo programa utilizado. Diante dos modelos implementados, partiu-se para a avaliação da eficácia da modelagem e uma primeira verificação da operacionalidade dos filtros propostos no que tange à compensação das componentes harmônicas a que se destinam. Os resultados obtidos foram encorajadores no sentido de mostrar a factibilidade operacional das propostas para fins da compensação de harmônicos, nos termos desejados;
- O capítulo IV foi centrado no processo da validação dos modelos computacionais dos filtros eletromagnéticos de seqüência zero e de seqüência positiva e negativa, sob condições operacionais consideradas ideais, ou seja: fonte de tensão senoidal e equilibrada, carga não-linear equilibrada, parâmetros de rede equilibrados e filtros com parâmetros apropriados à compensação harmônica. Os estudos computacionais,

comparados aos respectivos resultados laboratoriais, constituíram-se na base do processo utilizado, ratificando, assim, a eficácia da metodologia proposta para o processo de filtragem fundamentada em dispositivos eletromagnéticos. Ao término desta etapa ficou constatada uma boa correlação entre os desempenhos dos modelos experimentais e computacionais. Isto orienta para o fato que a pesquisa não apenas abriu horizontes para uma nova abordagem ao processo da filtragem via dispositivos eletromagnéticos, mas também viabilizou uma ferramenta computacional eficiente para fins de dimensionamento, análise de desempenho e outras aplicações.

- Tendo em vista que as redes elétricas reais possuem, inevitavelmente, desvios dos padrões ideais acima utilizados para as tensões trifásicas de suprimento, o capítulo V concentrou-se na avaliação dos fatores de influência no desempenho dos filtros eletromagnéticos sob enfoque. Desta forma, um conjunto de situações operacionais não-ideais, abordando alterações no sistema de suprimento, na carga não-linear e, por fim, no filtro sob enfoque (filtro de seqüência zero) foram consideradas e investigadas. Os estudos contemplaram ensaios laboratoriais e simulações computacionais. Os resultados evidenciaram que, sob tais condições de funcionamento, os filtros podem apresentar expressivas perdas de eficiência. Por tais motivos torna-se essencial que a aplicação dos dispositivos aqui investigados seja sempre precedida de estudos avaliativos para se evitar, por exemplo, aquecimentos excessivos e queda da eficiência acima de níveis permitidos.

Sintetizando, a pesquisa demonstrou a exequibilidade da utilização de dispositivos eletromagnéticos para fins da atenuação das distorções harmônicas. Esta filosofia de filtragem, embora já destacada por alguns autores através de outros arranjos que os aqui investigados, constitui-se numa estratégia simples, eficiente e de baixo custo. A favor desta

tecnologia pesa ainda a questão da nacionalidade do produto, o qual poderá ser, eventualmente, produzido por qualquer fabricante envolvido com transformadores ou reatores. A matéria prima também é 100% nacional, assim como também a propriedade da pesquisa. Como aspectos negativos destacam-se os pontos explorados no capítulo V, onde se constatou que, sob certas condições operacionais, os produtos investigados sofrem perda de eficiência. De um modo geral, tais situações ocorreram mais pronunciadamente para o filtro de harmônicos de seqüência positiva e negativa.

Como comentário final fica esclarecido que os trabalhos aqui documentados refletem um primeiro passo na direção do domínio desta tecnologia. Neste sentido, muito embora o reconhecimento dos expressivos avanços obtidos, apenas investigações complementares conduzirão a um aprimoramento e consolidação dos produtos focados nesta pesquisa, até sua disponibilização da forma de equipamentos comerciais. Para tanto, dentre outros aspectos não previstos nesta fase dos desenvolvimentos, reconhece-se a necessidade de maiores avanços quanto aos seguintes pontos:

- Domínio da técnica do projeto eletromagnético básico para fins construtivos e avaliações de desempenho de formas de montagem com vistas à otimização do processo de fabricação, minimização de dispersão, etc.;
- Estudos eletromagnéticos voltados para a identificação de campos magnéticos, dispersão e outros aspectos relevantes à área térmica via elementos finitos;
- Pesquisas relacionadas com um dispositivo bloqueador série para auxiliar o processo de filtragem quando do emprego do filtro de seqüência zero;
- Investigações sobre mecanismos de controle do filtro eletromagnético de seqüência positiva e negativa, de forma a acompanhar as alterações operacionais da rede e da carga;
- Análise de ruídos audíveis na operação de ambos os filtros eletromagnéticos;

- Investigações voltadas para o processo de otimização no que tange a redução da corrente fundamental absorvida pelos filtros de seqüência positiva e negativa, objetivando, dentre outros fatores, as influências apontadas no texto.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DUGAN, R. C., MCGRANAGHAN, M. F., SANTOSO, S., BEATY, H. W., *Electrical power systems quality – 2nd ed.*, McGraw-Hill, New York, 2003.
- [2] KERCHNER, R. M., CORCORAN, G. F., *Circuitos de corrente alternada*, Tradução: Reynaldo Resende e Ruy Pinto da Silva Sieczkowski, 3^a ed., Porto Alegre-RS, 1977.
- [3] PAICE, D. A., “*Power electronic converter harmonics: multipulse methods for clean power*”, 1st Edition, IEEE Press, New York, 1996.
- [4] KIMBARK, E. W., “*Direct current transmission*”, New York: Wiley-Interscience, 1971.
- [5] UHLMANN, E., “*Power transmission by direct current*”, Ludvika Springer-Verlag, 1975.
- [6] ARRILLAGA, J., “*Harmonic elimination*”, in II International Conference on Harmonics in Power Systems Proceedings, September, Manchester, England, pp. 37-75, 1981.
- [7] STRATFORD, R. P., STEEPER, D. E., “*Reactive compensation and harmonic suppression for industrial power systems using thyristor converters*”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-12, Nº. 3, pp. 232-254, May/June 1976
- [8] STRATFORD, R. P., “*Analysis and control of harmonic current in systems with static power converters*”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-17, Nº. 1, pp. 71-81, Jan/Feb 1981.
- [9] ARRILLAGA, J., BRADLEY, P. S., BOGDER, P. S., “*Power systems harmonics*”, John Wiley and Sons, New York, 2003.
- [10] GONZÁLES, D. A., McCALL, J. C., “*Design of filters to reduce harmonic distortion in industrial power systems*”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-23, Nº. 3, pp. 504-511, May/June 1987.

- [11] ALVES, A. C. B., “Análise de problemas e procedimentos na determinação de filtros harmônicos”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 1991.
- [12] CZARNECKI, L. S., “*Harmonic blocking compensator: an alternative for improving power quality*,” in Proceedings of IEEE 6th International Conference Harmonics Power System, Bologna, Italy, pp. 283-288, Sept 1994.
- [13] CZARNECKI, L. S., TAN, O. T., “*Evaluation and reduction of harmonic distortion caused by solid state voltage controllers of induction motors*”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 9, N° 3, pp. 528-534, Sept 1994.
- [14] HSU, S.-M., CZARNECKI, L. S., “*Harmonic blocking compensator with adaptive minimization of reactive and unbalanced currents*”, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 2, pp. 789-794, July 2000.
- [15] KEY, T., LAY, J-S., “*Analysis of harmonic mitigation methods for building wiring systems*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, N° 3, pp. 890-897, Aug. 1998.
- [16] KEY, T., LAY, J-S., “*Comparison of standards and power supply design options for limiting harmonic distortion in power systems*”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, N° 4, pp. 688-695, July/Aug. 1993.
- [17] LAWRENCE, W. B., Michalik, G., Mielczarski, W. Szczepanik, J., “*Reduction of harmonic pollution in distribution networks*”, IEEE Catalogue N° 95TH8130, pp. 198-202, 1995.
- [18] SWAMY, M. M., “*Harmonic reduction using broad band filters*”, GE Transmission, Distribution and Industrial Systems, New York, <www.GEIndustrial.com>, pp.1-21, 2006.
- [19] LEWIS, F. A., HOUDEK, J. A., “*Reactors provide a low-cost solution to inverter/driver power quality*”, <www.mtecorp.com/reactors.html>, pp. 1-4, 2006.
- [20] YACAMINI, R., OLIVEIRA, J. C., “*Harmonics in multiple converter systems: a generalized approach*”, IEE Proceedings, Vol. 127, Pt. B, N° 2, pp. 96-106, March 1980.
- [21] LING, P. J. A., ELDRIDGE, C. J., “*Designing modern electrical systems with transformers that inherently reduce harmonic distortion in a pc-rich environment*”, PowerSmiths International Corporation, 416-439-1077, pp. 1-13, 2000.

- [22] SOUTO, O. C. N., “Contribuições à modelagem de cargas elétricas não lineares e propostas para a redução de harmônicos”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 1995.
- [23] FERGUSON, G. N. C., TECH, B., “*Power quality improvement in a harmonic environment*”, International Electrical Testing Association (NETA) Annual Technical Conference, pp. 1-9, March 1997.
- [24] KHERA, P. P., “*Application of zigzag transformers for reducing harmonics in the neutral conductor of low voltage distribution system*”, in Proceedings IEEE IAS, Vol. 2, pp. 1092-1096, 1990.
- [25] CHOI, S., ENJETI, P. N., PITEL, J., “*Polyphase transformer arrangements with reduced kva capacities for harmonic current reduction in rectifier type utility interface*”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 11, Nº. 5, pp. 680-690, Sept. 1996.
- [26] SASAKI, H., MACHIDA, T., “*A new method to eliminate ac harmonic currents by magnetic flux compensation - considerations on basic design*”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, Nº. 5, pp. 2009-2019, Sept/Oct 1971.
- [27] XIANGQIAN, T., JIN, X., XUEJUNYI, W. W., “*Active reactor based on harmonic magnetic flux compensation*”, Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS, Vol. 3, pp. 1750-1754, Sept. 2005.
- [28] SAMRA, A. H., TESHOME, A., “*Current injection method to eliminate harmonics in ac power systems*”, Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, pp: 85-91, May 1993.
- [29] SINGH, B.; BHUVANESWARI, G.; GARG, V., “*Harmonic current injection for varying rectifier loads*”, IEEE INDICON, pp.143-147, Dec. 2005
- [30] AMETANI, A., “*Harmonic reduction in thyristor converts by harmonic current injection*”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, Nº. 2, pp. 441-449, March/April 1976.
- [31] RASTOGI, M., NAIK, R., MOHAN N., “*Optimization of a novel dc link current modulated interface with 3-phase utility systems to minimize line current harmonics*”, IEEE PESC, pp. 162-167, 1992.
- [32] SENSARMA, P. S., PADIYAR, K. R., RAMANARAYANAN, V., “*A comparative study of harmonic filtering strategies for a shunt active filter*”; Industry Applications Conference, Vol. 4, pp. 2509-2516, 2000.

- [33] AKAGI, H.; “*Active harmonic filters*”, Proceedings of the IEEE, Vol. 93, Nº 12, pp. 2128-2141, Dec. 2005.
- [34] DEPENBROCK, M., “*The FBD-method, a generally applicable tool for analysing power relations*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, Nº. 2, pp. 381-387, May 1993.
- [35] AKAGI, H., KANAZAWA, Y., NABAE, A., “*Instantaneous reactive power compensator comprising switching devices without energy storage components*”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-20, Nº. 3, pp. 625-630, May/June 1984.
- [36] AKAGI, H., NABAE, A., ATOH, S., “*Control strategy of active power filter using multiple voltage source pwm converters*”, IEEE Transactions on Industry Applications., Vol. IA-22, Nº. 3, May/June 1986.
- [37] PENG, F. Z., AKAGI, H., NABAE, A., “*A study of active power filters using quad-series voltage-source pwm converters for harmonic compensation*”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 5, Nº. 1, pp. 9-15, Jan. 1990.
- [38] AKAGI, H., “*New trends in active filters for power conditioning*”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, Nº. 6, pp. 1311-1322, Nov./Dec. 1996.
- [39] PENG, F. Z., AKAGI, H., NABAE, A., “*A new approach to harmonic compensation in power systems*”, IEEE/IAS Annual Meeting Conference, pp. 874-880, 1988.
- [40] PENG, F. Z., KOHATA, M., AKAGI, H., “*Compensation characteristics of the combined system of shunt passive and series active filters*”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, Nº.1, pp. 144-152, Jan/Feb. 1993.
- [41] PENG, F. Z., AKAGI, H., NABAE, A., “*A new approach to harmonic compensation in power systems - a combined system of shunt passive and series active filters*”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 26, Nº. 6, pp. 983-990, Nov./Dec.1990.
- [42] AREDES, M., WATANABE, E. H., “*Power quality considerations on shunt/series current and voltage conditioners*”, 10th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power, Vol. 2, pp. 595-600, 2002
- [43] AREDES, M., “*Active power line conditioners*”, Dr.-Ing. Thesis, Technische Universität Berlin, 1996.

- [44] AREDES, M., HEUMANN, K., WATANABE, E. H., “*An universal active power line conditioner*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, Nº. 2, pp. 545-551, April 1998.
- [45] RATANAPANACHOTE, S., ENJETI, P. N., KANG, M., “*Auto-connected electronic phase-shifting transformer concept for reducing harmonic generated by nonlinear loads in electric power distribution system*”, IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 1030-1035, 2001.
- [46] FERREIRA, J. F. V., “*Uma nova abordagem à filtragem de harmônicos de seqüência zero através de dispositivos eletromagnéticos*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- [47] DAHONO, P. A., WIDJAYA, R. E., SYAFRUDIN, QAMARUZZAMAN, “*A practical approach to minimize the zero-sequence current harmonics in power distribution systems*”, in IEEE Proceedings Power Conversion Conference, Vol. 2, pp. 683–686, Aug. 1997.
- [48] BELCHIOR, F. N., FERREIRA, J. F. V., OLIVEIRA, J. C., APOLONIO, R., VASCONCELLOS, A. B., “*Unified zero sequence electromagnetic filter*”, Proceedings on 8th IASTED International Conference on Power and Energy Systems, pp. 13-18, Oct. 2005.
- [49] JOU, H-L., WU, J-C., WU, K-D., CHIANG, W-J., CHEN, Y-H., “*Analysis of zig-zag transformer applying in the three-phase four-wire distribution power system*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, Nº. 2, pp. 1168-1173, April 2005.
- [50] KIM, S. S., ENJETI, P. N., PITEL I, J., “*A new approach to improve power factor and reduce harmonics in a three-phase diode rectifier type utility interface*”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, Nº. 6, pp 1557-1564, 1994.
- [51] MEZA, J. C., SAMRA, A. H., “*A new technique to reduce line-current harmonics generated by a three-phase bridge rectifier*”, Proceedings Southeast on IEEE, pp 354-359, 1998.
- [52] VASCONCELLOS, A. B., Modelagem e análise de desempenho de compensadores estáticos a reator à núcleo saturado no contexto da qualidade da energia, Uberlândia: UFU, 2004 (Tese, Doutorado em Engenharia Elétrica).
- [53] APOLÔNIO, R., Modelagem e chaveamento controlado de transformadores: análise computacional e validação experimental, Uberlândia: UFU, 2004 (Tese, Doutorado em Engenharia Elétrica).

- [54] FUCHS, E. F., YOU, Y., “*Measurement of λ -i characteristics of asymmetric three-phase transformers and their applications*”, Proceedings on 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Vol. 1, pp. 91-96, Oct. 2000.
- [55] APOLÔNIO, R., OLIVEIRA, J. C., VASCONCELLOS, A. B., OLIVEIRA, A., SOUTO, O. C. N., “*Filtro eletromagnético para harmônicos de seqüência zero*”, V Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, Agosto 2003.
- [56] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, “Submódulo 2.2 - Padrões de Desempenho da Rede Básica”, Dezembro 2002.
- [57] ABREU, J. P. G.; EMANUEL, A.E., “*Induction motor thermal aging caused by voltage distortion and imbalance: loss of useful life and its estimated cost*”, IEEE Transactions Industry Applications, Vol. 38, N° 1, pp.12-20, Jan. 2002.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)