

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



AVALIAÇÃO DE FILTROS ELETROMAGNÉTICOS E
SINTONIZADOS LC PARA MINIMIZAÇÃO DE
CORRENTES DE SEQUÊNCIA ZERO EM SISTEMAS
DE DISTRIBUIÇÃO A QUATRO FIOS

Nilo Sérgio Soares Ribeiro

Uberlândia, 10 de maio de 2007

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

AVALIAÇÃO DE FILTROS ELETROMAGNÉTICOS E
SINTONIZADOS LC PARA MINIMIZAÇÃO DE
CORRENTES DE SEQUÊNCIA ZERO EM SISTEMAS
DE DISTRIBUIÇÃO A QUATRO FIOS

Dissertação apresentada por Nilo Sérgio Soares
Ribeiro à Universidade Federal de Uberlândia,
para a obtenção do título de Mestre em Ciências

Banca Examinadora:

Milton Itsuo Samesima, Drº (**Orientador**) – UFU
José Wilson Resende, **PhD** – UFU
Antônio César Baleeiro Alves **Drº** - UFG

Uberlândia, 10 de maio de 2007

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

R484a Ribeiro, Nilo Sérgio Soares Ribeiro, 1978-
 Avaliação de filtros eletromagnéticos e sintonizados LC para
 minimização de correntes de sequência zero em sistemas de distribuição a
 quatro fios / Nilo Sérgio Soares Ribeiro . - 2007.
 240 f. : il.

 Orientador: Milton Itsuo Samesima.
 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa
 de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
 Inclui bibliografia.

 1. Energia elétrica - Qualidade - Teses. I. Samesima, Milton Itsuo. II.
 Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
 Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

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

AVALIAÇÃO DE FILTROS ELETROMAGNÉTICOS E SINTONIZADOS LC PARA MINIMIZAÇÃO DE CORRENTES DE SEQUÊNCIA ZERO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO A QUATRO FIOS

Nilo Sérgio Soares Ribeiro

Dissertação apresentada por Nilo Sérgio Soares Ribeiro à
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção
do título de Mestre em Ciências.

Prof. Milton Itsuo Samesima, Dr^o
(Orientador)

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

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus primeiros mestres, meus pais, Nilo Sérgio de Oliveira Ribeiro e Léa da Silva Soares pela dedicação e empenho para que eu pudesse chegar até aqui, minha irmã Célia pela força e incentivos e a minha noiva Karina Faustino Teles pela compreensão e companheirismo.

*As dificuldades que se apresentam ao longo
da vida nada mais são do que a forma
embrionária das oportunidades.*

Nilo Sérgio Soares Ribeiro

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a **Deus** por todas as oportunidades, desafios, saúde, paz, conforto nos momentos de fraqueza, e sabedoria nos momentos de decisão.

Ao Prof. **Drº Milton Itsuo Samesima** pela orientação no desenvolvimento deste trabalho e paciência em meus questionamentos.

Aos amigos da Pós-Graduação **João Salve, Willians Mendes, Msc. Augusto Fleury, Carlos Eduardo, Paulo Henrique, “Gaúcho”, Drª. Ana Claudia, Carlos Eduardo (Cadu), Drº Fernando Nunes Belchior, Drº Bismarck Castillo, Célia, Ivan Nunes**, além dos amigos da pensão da dona Tereza, onde passei bons momentos em minha breve estadia em Uberlândia, o meu sincero **MUITO OBRIGADO**.

Aos demais colegas e professores da pós-graduação, pelo incentivo e apoio que em muito contribuíram para o término desta dissertação, e todas as pessoas que direta ou indiretamente apoiaram-me durante esta etapa de minha vida.

À **Marli Junqueira** pela presteza nos serviços junto à secretaria da pós-graduação, em particular por toda paciência em responder todos os meus questionamentos.

Agradecimentos à ELETRONORTE pelo apoio e incentivo.

À **CAPES** pelo apoio financeiro.

RESUMO

A qualidade da energia elétrica se apresenta como uma área de grande interesse para os consumidores e concessionárias de energia elétrica. O aumento deste interesse é explicado pelo aprimoramento da legislação pertinente a esta área e ao nível de esclarecimento dos consumidores, cada vez mais conscientes de seus direitos. Em se tratando do tema qualidade da energia, têm-se as distorções harmônicas como um dos itens de maior preocupação, devido à quantidade de cargas não lineares conectadas ao sistema, e ao nível de sensibilidade dos equipamentos frente a tais distúrbios. Neste contexto, a presente dissertação apresenta o princípio de operação, modelagem, implementação computacional e estudos de desempenho de filtros para a minimização do fluxo de correntes de seqüência zero em sistemas de distribuição trifásicos a quatro fios. Esta pesquisa contempla o emprego de cinco estruturas com filosofias diferentes. O estudo foi desenvolvido com o auxílio do programa *Eletromagnetic Transient Program - ATP/EMTP*, onde foi modelado um sistema de distribuição real, apresentando os mesmos níveis de distorções harmônicas observadas em medições nas fases e no neutro do transformador de uma subestação real.

Palavras-chave: *Eletromagnetic Transient Program, correntes harmônicas, filtros sintonizados, filtros eletromagnéticos, seqüência zero, correntes de neutro, técnicas para mitigação de harmônicos.*

ABSTRACT

The power quality appears as an important area of interest of customers and the power utilities. The increase of this interest it is explained by the improvement of the legislation pertinent to this area and the level of clarification of the customers, they are each time more conscientious of yours rights. By the power quality subject, the harmonic distortion are had as one of itens of great concern, due to the amount of no linear loads connected to the system, and the level of sensitivity of the equipment submitted to this disturbs. In this context, the present document shows the operational principle, modeling, computational implementation and performance studies of the filters for to minimize of the zero sequence current flow in the three-phase four-wire distribution systems. This research contemplates the analysis of five structures with different philosophies. The study was developed with assist of the Electromagnetic Transient Program - ATP/EMTP, where a real distribution system was modeled, presenting the same levels of harmonic distortions observed in measurements in the phases wire, and the neutral conductor of the power transformer in the real substation.

Keywords: *Electromagnetic Transient Program, harmonic currents, syntonized filters, electromagnetic filters, zero sequence, neutral currents, and techniques for harmonics elimination.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	xiv
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.3 RELEVÂNCIA.....	4
1.4 METODOLOGIA.....	5
1.5 CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA DISSERTAÇÃO.....	6
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	6
CAPÍTULO II.....	9
CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE CORRENTES HARMÔNICAS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA.....	9
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	9
2.2 DISTORÇÕES HARMÔNICAS – CONCEITOS GERAIS.....	11
2.3 CARGAS GERADORAS DE CORRENTES HARMÔNICAS.....	14
2.3.1 Cargas de conexão direta ao sistema.....	15
2.3.2 Cargas conectadas através de conversores.....	15
2.3.3 Cargas residenciais.....	16
2.4 EFEITOS DA DISTORÇÃO HARMÔNICA NO SISTEMA ELÉTRICO.....	17
2.4.1 Efeitos das distorções harmônicas sobre a resistência de condutores elétricos.....	18
2.4.2 Efeitos das distorções harmônicas nos motores de indução.....	19
2.4.3 Efeitos das distorções harmônicas sobre transformadores.....	20
2.5 PARTICULARIDADES DAS CORRENTES DE SEQUÊNCIA ZERO.....	24
2.6 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE TRABALHOS CORRELATOS.....	27
2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	35
CAPÍTULO III.....	36
MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DOS FILTROS DE CORRENTES DE SEQUÊNCIA ZERO EM SISTEMA TESTE.....	36
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	36
3.2 MODELAGEM COMPUTACIONAL DO SISTEMA TESTE.....	37
3.2.1 Modelagem e implementação computacional da estrutura do filtro tipo 1.....	41
3.2.1.1 Princípio operativo do transformador zig-zag.....	42
3.2.1.2 Dimensionamento do banco de transformadores.....	48
3.2.1.3 Comentários sobre o modelo.....	53

3.2.2	Modelagem e implementação computacional da estrutura do filtro tipo 2.....	54
3.2.2.1	Princípio operativo do compensador bloqueador de harmônicos.....	54
3.2.2.2	Dimensionamento do filtro em série (tipo 2).....	57
3.2.2.3	Comentários sobre o modelo.....	62
3.2.3	Modelagem e implementação computacional da estrutura do filtro tipo 3.....	63
3.2.3.1	Princípio operativo do filtro harmônico sintonizado em derivação.....	64
3.2.3.2	Dimensionamento do filtro em derivação.....	66
3.2.3.3	Comentários sobre o modelo.....	77
3.2.4	Modelagem e implementação computacional da estrutura do filtro tipo 4.....	77
3.2.4.1	Princípio operativo do filtro harmônico sintonizado em série.....	78
3.2.4.2	Dimensionamento do filtro em série.....	79
3.2.4.3	Comentários sobre o modelo.....	90
3.2.5	Modelagem e implementação computacional da estrutura do filtro tipo 5.....	91
3.2.5.1	Dimensionamento do filtro em série no neutro.....	91
3.2.5.2	Comentários sobre o modelo.....	95
3.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	96
CAPÍTULO IV.....		100
APLICAÇÃO DE FILTROS HARMÔNICOS PASSIVOS LC E		
ELETROMAGNÉTICOS NA MINIMIZAÇÃO DE CORRENTES DE		
SEQÜÊNCIA ZERO EM SISTEMAS AÉREOS DE DISTRIBUIÇÃO.....		100
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	100
4.2	MODELAGEM DO ALIMENTADOR ESTUDADO NO ATP.....	104
4.3	AVALIAÇÃO DO FILTRO TIPO 1.....	110
4.3.1	Comentários gerais.....	119
4.4	AVALIAÇÃO DO FILTRO TIPO 2.....	119
4.4.1	Comentários gerais.....	126
4.5	AVALIAÇÃO DO FILTRO TIPO 3.....	127
4.5.1	Comentários gerais.....	142
4.6	AVALIAÇÃO DO FILTRO TIPO 4.....	143
4.6.1	Comentários gerais.....	160
4.7	AVALIAÇÃO DO FILTRO TIPO 5.....	161
4.7.1	Comentários gerais.....	171
4.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	172
CAPÍTULO V.....		177
CONCLUSÕES FINAIS.....		177
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE TRABALHOS CORRELATOS.....		183
ANEXOS.....		193
ANEXO A.....		193
ANEXO B.....		195
ANEXO C.....		198
ANEXO D.....		220
ANEXO E.....		222

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 –	Relação entre uma tensão aplicada a uma carga versus sua corrente de carga.....	10
Figura 2.2 –	Corrente típica de um retificador monofásico.....	12
Figura 2.3 –	Fluxo convencional de correntes harmônicas no sistema de potência.....	17
Figura 2.4 –	Sistema teste simulado para medição da corrente no condutor neutro.....	24
Figura 2.5 –	Tensões e correntes de fase do sistema da figura 2.4.....	25
Figura 2.6 –	Corrente no condutor neutro do sistema da figura 2.4.....	25
Figura 2.7 –	Espectro harmônico das correntes de fase e de neutro.....	26
Figura 2.8 –	Filtros passivos em derivação e em série.....	30
Figura 2.9 –	Filtro ativo em derivação com a carga.....	32
Figura 2.10 –	Filtro ativo em série com a carga.....	32
Figura 2.11 –	Filtro ativo composto (híbrido).....	32
Figura 2.12 –	Estruturas magnéticas utilizadas como filtros de seqüência zero.....	34
Figura 3.1 –	Sistema teste para a modelagem e implementação computacional dos filtros utilizados nesta dissertação.....	38
Figura 3.2 –	Formas de onda e espectro harmônico das correntes de linha do sistema teste.....	39
Figura 3.3 –	Espectro harmônico da corrente no neutro do sistema.....	40
Figura 3.4 –	Corrente instantânea no condutor neutro versus corrente eficaz.....	40
Figura 3.5 –	Conexão de três unidades monofásicas de modo a formar uma unidade trifásica em ligação zig-zag.....	42
Figura 3.6 –	Configuração da aplicação do transformador zig-zag no sistema teste.....	44
Figura 3.7 –	Circuito equivalente de seqüência zero para o sistema da figura 3.6.....	44
Figura 3.8 –	Tensões de fase e correntes de linha do sistema teste antes da conexão do banco de transformadores.....	49
Figura 3.9 –	Corrente no neutro do sistema teste antes da conexão do banco de transformadores.....	49
Figura 3.10 –	Tensões de fase e correntes de linha do sistema teste após a conexão do banco de transformadores.....	51
Figura 3.11 –	Corrente eficaz no neutro antes e depois da conexão do transformador zig-zag em derivação com a carga.....	51
Figura 3.12 –	Espectro harmônico da corrente no condutor neutro do sistema antes e após a conexão do filtro.....	52
Figura 3.13 –	Espectro harmônico da corrente da fase A do sistema antes e após a conexão do filtro.....	52
Figura 3.14 –	Circuito equivalente do filtro LC série: Compensador bloqueador de harmônicos.....	55
Figura 3.15 –	Tensões de fase e correntes de linha do sistema teste antes da conexão do banco de transformadores.....	58
Figura 3.16 –	Correntes de linha e no neutro do sistema teste após a conexão do filtro.....	59
Figura 3.17 –	Espectro harmônico da corrente da fase A do sistema antes e após a conexão do filtro.....	59
Figura 3.18 –	Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após a conexão do filtro.....	60

Figura 3.19 – Tensões de fase antes e após a conexão do filtro.....	61
Figura 3.20 – Espectro harmônico da tensão de fase do sistema teste antes e após a conexão do filtro.....	61
Figura 3.21 – Diagrama de um circuito RLC em série.....	64
Figura 3.22 – Tensões de fase e correntes de linha antes da conexão do filtro.....	67
Figura 3.23 – Espectro harmônico da corrente da fase A antes da conexão do filtro.....	67
Figura 3.24 – Espectro harmônico da corrente circulante pelo neutro do sistema da figura 3.1.....	68
Figura 3.25 – Variação do módulo e ângulo da impedância do filtro com a frequência..	69
Figura 3.26 – Diagrama resultante por fase do sistema com o filtro de correntes de terceira ordem.....	69
Figura 3.27 – Tensões de fase e correntes de linha após a conexão do filtro.....	70
Figura 3.28 – Espectro harmônico da corrente da fase A após a conexão do filtro.....	71
Figura 3.29 – Espectro harmônico da corrente no neutro após a conexão do filtro.....	71
Figura 3.30 – Corrente RMS no neutro do transformador sem e com a conexão do filtro em derivação para a terceira harmônica.....	72
Figura 3.31 – Variação do módulo e ângulo da impedância do filtro com a frequência..	73
Figura 3.32 – Tensões de fase e correntes de linha do sistema após a conexão do Filtro.....	74
Figura 3.33 – Comparativo entre a corrente RMS que circula no neutro do transformador sem a presença dos filtros; com filtro de terceira ordem e com os filtros de terceira e quinta ordens.....	74
Figura 3.34 – Tensão de fase do sistema sem a presença do filtro; com o filtro de terceira ordem e com os filtros de terceira e quinta ordens.....	75
Figura 3.35 – Espectro harmônico da corrente de linha do sistema sem a presença do filtro; com o filtro de terceira ordem e com os filtros de terceira e quinta ordens.....	75
Figura 3.36 – Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes da conexão dos filtros; com filtro de terceira ordem e com os filtros de terceira e quinta ordens.....	76
Figura 3.37 – Diagrama resultante por fase do sistema com o filtro de correntes de terceira ordem.....	78
Figura 3.38 – Variação do módulo e ângulo da impedância do filtro com a frequência..	82
Figura 3.39 – Tensões de fase antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 9ª ordens.....	83
Figura 3.40 – Correntes de linha antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 9ª ordens.....	84
Figura 3.41 – Comparativo entre a corrente RMS que circula no neutro do transformador sem e com a presença dos filtros de 3ª e 9ª ordens.....	85
Figura 4.42 – Espectro harmônico da tensão de fase do sistema antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 9ª ordem.....	85
Figura 3.43 – Espectro harmônico da corrente de linha do sistema antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 9ª ordem.....	86
Figura 3.44 – Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 9ª ordem.....	86
Figura 3.45 – Tensões de fase do sistema teste antes e após a conexão dos filtros série e derivação.....	87
Figura 3.46 – Correntes de linha do sistema teste antes e após a conexão dos filtros série e derivação.....	88
Figura 3.47 – Comparativo entre a corrente RMS que circula no neutro do transformador sem e com a presença dos filtros de 3ª e 5ª ordens.....	89

Figura 3.48 –	Espectro harmônico da tensão de fase do sistema antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 5ª ordens em derivação.....	89
Figura 3.49 –	Espectro harmônico da corrente de linha do sistema antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 5ª ordens em derivação.....	90
Figura 3.50 –	Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 5ª ordem.....	90
Figura 3.51 –	Diagrama resultante por fase do sistema com o filtro de correntes de terceira ordem.....	92
Figura 3.52 –	Tensões de fase do sistema teste antes e após a conexão do filtro série no neutro.....	93
Figura 3.53 –	Correntes de linha do sistema teste antes e após a conexão do filtro no neutro do sistema.....	93
Figura 3.54 –	Comparativo entre a corrente RMS que circula no neutro do transformador da saída do alimentador sem e com a presença do filtro de 3ª ordem no neutro.....	94
Figura 3.55 –	Espectro harmônico da tensão de fase do sistema antes e após a conexão do filtro de 3ª ordem no neutro do sistema.....	94
Figura 3.56 –	Espectro harmônico da corrente de linha do sistema antes e após a conexão do filtro de 3ª ordem.....	95
Figura 3.57 –	Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após a conexão do filtro de 3ª ordem.....	95
Figura 4.1 –	Espectro harmônico da corrente de linha, obtido na medição.....	102
Figura 4.2 –	Espectro harmônico da tensão de fase, obtido na medição.....	102
Figura 4.3 –	Espectro harmônico da corrente no neutro do transformador da subestação.....	102
Figura 4.4 –	Perfil de tensão de um dia típico, obtido pela medição (01/10/2005).....	103
Figura 4.5 –	Perfil de corrente no neutro de um dia típico, obtido pela medição (01/10/2005).....	103
Figura 4.6 –	Componentes do ATP.....	105
Figura 4.7 –	Tensões de fase e correntes de linha na saída do alimentador sem filtro...	105
Figura 4.8 –	Espectro harmônico da tensão de fase na saída do alimentador sem a presença dos filtros.....	106
Figura 4.9 –	Espectro harmônico da corrente de linha na saída do alimentador sem a presença dos filtros.....	106
Figura 4.10 –	Espectro harmônico da corrente no neutro do transformador na saída do alimentador sem a presença dos filtros.....	107
Figura 4.11 –	Corrente RMS no neutro do transformador do alimentador.....	108
Figura 4.12 –	Tensões de fase e corrente de linha do sistema antes da conexão do banco de transformadores.....	109
Figura 4.13 –	Espectro harmônico das tensões de fase no ponto de conexão dos filtros..	109
Figura 4.14 –	Espectro harmônico das correntes de linha no ponto de conexão dos filtros.....	110
Figura 4.15 –	Tensões de fase do sistema antes e após da conexão do banco de transformadores.....	111
Figura 4.16 –	Espectro harmônico das tensões de fase no ponto de conexão sem e com o filtro eletromagnético.....	112
Figura 4.17 –	Correntes de linha antes e após a conexão do banco de transformadores...	112
Figura 4.18 –	Espectro harmônico das correntes de linha no ponto de conexão dos filtros, antes e após a conexão do banco de transformadores.....	113

Figura 4.19 –	Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após a conexão do banco de transformadores.....	113
Figura 4.20 –	Espectro harmônico da corrente de neutro do banco de transformadores após a conexão do banco de transformadores.....	114
Figura 4.21 –	Corrente RMS no neutro do transformador do alimentador.....	115
Figura 4.22 –	Tensões de fase do sistema antes e após a conexão do banco de transformadores.....	116
Figura 4.23 –	Correntes de linha do sistema antes e após a conexão do banco de transformadores.....	116
Figura 4.24 –	Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de fase sem e com a presença do banco de transformadores.....	117
Figura 4.25 –	Comparação entre os espectros harmônicos das correntes de linha sem e com a presença do banco de transformadores.....	117
Figura 4.26 –	Tensões de fase do sistema antes e após a conexão dos filtros em série sintonizados na frequência fundamental.....	120
Figura 4.27 –	Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de fase sem e com a presença dos filtros em série.....	121
Figura 4.28 –	Correntes de linha antes e após a conexão dos filtros em série.....	121
Figura 4.29 –	Espectro harmônico das correntes de linha no ponto de conexão dos filtros, antes e após a conexão dos filtros em série.....	122
Figura 4.30 –	Espectro harmônico das correntes de neutro do sistema antes e após a conexão dos filtros em série.....	122
Figura 4.31 –	Corrente RMS no neutro do transformador do alimentador.....	123
Figura 4.32 –	Tensões de fase do sistema antes e após a conexão dos filtros.....	124
Figura 4.33 –	Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de fase na saída do alimentador sem e com a presença dos filtros.....	124
Figura 4.34 –	Comparação entre os espectros harmônicos das correntes de linha na saída do alimentador sem e com a presença dos filtros.....	125
Figura 4.35 –	Comparação entre os espectros harmônicos das correntes de linha na saída do alimentador sem e com a presença dos filtros.....	125
Figura 4.36 –	Tensões de fase do sistema antes e após a conexão dos filtros de 3ª ordem.....	129
Figura 4.37 –	Tensões de fase do sistema antes e após a conexão dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens.....	130
Figura 4.38 –	Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de fase sem e com a presença dos filtros de 3ª ordem.....	131
Figura 4.39 –	Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de fase sem e com a presença dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens.....	131
Figura 4.40 –	Variação da impedância dos filtros com a frequência.....	132
Figura 4.41 –	Correntes de linha antes e após a conexão dos filtros de 3ª ordem.....	133
Figura 4.42 –	Correntes de linha antes e após a conexão dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens.....	134
Figura 4.43 –	Espectro harmônico das correntes de linha no ponto de conexão dos filtros, antes e após a conexão dos filtros de 3ª ordem.....	135
Figura 4.44 –	Espectro harmônico das correntes de linha no ponto de conexão dos filtros, antes e após a conexão dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens.....	135
Figura 4.45 –	Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após a conexão dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens.....	136
Figura 4.46 –	Corrente RMS no neutro do transformador do alimentador.....	136

Figura 4.47 – Tensões de fase do sistema antes e após a conexão dos filtros de 3ª ordem.....	138
Figura 4.48 – Correntes de linha do sistema antes e após a conexão dos filtros de 3ª ordem.....	138
Figura 4.49 – Tensões de fase do sistema antes e após a conexão dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens.....	139
Figura 4.50 – Correntes de linha do sistema antes e após a conexão dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens.....	139
Figura 4.51 – Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de fase sem e com a presença dos filtros de 3ª e 5ª ordens, na saída do alimentador.....	140
Figura 4.52 – Espectro harmônico das correntes de linha na saída do alimentador, antes e após a conexão dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens.....	140
Figura 4.53 – Tensões de fase e correntes de linha das fases A, B e C.....	141
Figura 4.54 – Tensões de fase antes e depois da conexão dos filtros de 3ª e 9ª ordens em série lado do sistema.....	144
Figura 4.55 – Tensões de fase do lado do sistema e da carga com os filtros de 3ª e 9ª ordens.....	145
Figura 4.56 – Espectro harmônico da tensão de fase no ponto de conexão dos filtros, antes do filtro (lado do sistema) e após o filtro (lado da carga).....	146
Figura 4.57 – Interação da impedância harmônica dos filtros de 3ª e 9ª com o sistema devido a variação da frequência.....	146
Figura 4.58 – Correntes de linha com os filtros de 3ª e 9ª ordens do lado do sistema e da carga.....	147
Figura 4.59 – Espectro harmônico das correntes de linha antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 9ª ordens, em série.....	148
Figura 4.60 – Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 9ª ordens.....	148
Figura 4.61 – Corrente RMS no neutro do transformador do alimentador sem e com os filtros de 3ª e 9ª ordens.....	149
Figura 4.62 – Tensões de fase antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 9ª ordens na saída do alimentador.....	150
Figura 4.63 – Correntes de linha antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 9ª ordens, na saída do alimentador.....	151
Figura 4.64 – Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de fase sem e com a presença dos filtros de 3ª e 9ª ordens, na saída do alimentador.....	151
Figura 4.65 – Tensões de fase no ponto de conexão dos filtros, no lado do sistema, com os filtros série e antes e após a conexão dos filtros em derivação.....	153
Figura 4.66 – Correntes de linha no ponto de conexão dos filtros, no lado do sistema, com os filtros série e antes da conexão dos filtros em derivação.....	153
Figura 4.67 – Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de fase com somente os filtros série e com a presença dos filtros série e derivação, no ponto de conexão dos filtros, no lado do sistema.....	154
Figura 4.68 – Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de fase com somente os filtros série e com a presença dos filtros série e derivação, no ponto de conexão dos filtros, no lado da carga.....	154
Figura 4.69 – Comparação entre os espectros harmônicos das correntes de linha com somente os filtros série e com a presença dos filtros série e derivação, no ponto de conexão dos filtros, no lado do sistema.....	155

Figura 4.70 –	Comparação entre os espectros harmônicos das correntes de linha com somente os filtros série e com a presença dos filtros série e derivação, no ponto de conexão dos filtros, no lado da carga.....	156
Figura 4.71 –	Tensões de fase na saída do alimentador com os filtros série e antes da conexão dos filtros em derivação.....	156
Figura 4.72 –	Correntes de linha na saída do alimentador, com os filtros série e antes da conexão dos filtros em derivação.....	157
Figura 4.73 –	Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de fase com somente os filtros série e com a presença dos filtros série e derivação, na saída do alimentador.....	158
Figura 4.74 –	Comparação entre os espectros harmônicos das correntes de linha com somente os filtros série e com a presença dos filtros série e derivação, na saída do alimentador.....	158
Figura 4.75 –	Comparação entre os espectros harmônicos das correntes no neutro com somente os filtros série e com a presença dos filtros série e derivação.....	159
Figura 4.76 –	Corrente RMS no neutro do transformador do alimentador, com somente os filtros em série e com os filtros em série e derivação.....	159
Figura 4.77 –	Tensões de fase antes e após a conexão do filtro de 3ª ordem em série, no ponto de conexão dos filtros.....	163
Figura 4.78 –	Espectro harmônico das tensões de fase no ponto de conexão dos filtros, antes e após a conexão dos filtros.....	164
Figura 4.79 –	Interação da impedância harmônica do filtro de 3ª ordem em série com o sistema devido a variação da frequência.....	164
Figura 4.80 –	Correntes de linha sem e com o filtro de 3ª ordem, no ponto de conexão dos filtros.....	165
Figura 4.81 –	Espectro harmônico das correntes de linha antes e após a conexão do filtro de 3ª ordem, em série, no ponto de conexão dos filtros.....	166
Figura 4.82 –	Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após a conexão do filtro de 3ª ordem.....	166
Figura 4.83 –	Corrente RMS no neutro do transformador do alimentador sem e com o filtro de 3ª ordem.....	167
Figura 4.84 –	Tensões de fase antes e após a conexão do filtro de 3ª ordem, na saída do alimentador.....	168
Figura 4.85 –	Correntes de linha antes e após a conexão do filtro de 3ª ordem, na saída do alimentador.....	169
Figura 4.86 –	Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de fase sem e com a presença do filtro de 3ª ordem, na saída do alimentador.....	169

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 –	Redução da vida útil em função do aumento adicional de temperatura.....	22
Tabela 2.2 –	Elevação da vida útil em função da diminuição de temperatura.....	22
Tabela 3.1 –	Relação de potência entre transformadores com baixa impedância de sequência zero.....	41
Tabela 3.2 –	Parâmetros dos transformadores do filtro tipo 1.....	50
Tabela 3.3 –	Resumo e comparação entre as correntes de neutro do sistema, correntes de linha e corrente pelo neutro do transformador.....	53
Tabela 3.4 –	Elementos RLC do filtro utilizados na modelagem dos filtros em série....	58
Tabela 3.5 –	Resumo do estudo da modelagem do filtro bloqueador harmônico.....	62
Tabela 3.6 –	Resumo dos parâmetros do sistema e do filtro de 3ª ordem modelado.....	68
Tabela 3.7 –	Resumo dos parâmetros do sistema e do filtro de 5ª ordem modelado.....	72
Tabela 3.8 –	Resumo dos parâmetros dos filtros de 3ª e 9ª ordem modelados.....	82
Tabela 3.9 –	Resumo dos parâmetros dos filtros de 3ª e 5ª ordem modelados.....	87
Tabela 3.10 –	Resumo dos parâmetros do filtro de 3ª ordem modelado.....	92
Tabela 3.11 –	Quadro resumo dos tipos de filtros considerados.....	98
Tabela 4.1 –	Fator de potência, por fase, no ponto de conexão dos filtros sem a presença dos filtros.....	107
Tabela 4.2 –	Parâmetros dos transformadores do filtro tipo 1.....	111
Tabela 4.3 –	Fator de potência, por fase, no ponto de conexão dos filtros após a conexão do banco de transformadores.....	115
Tabela 4.4 –	Variação do fator de potência, por fase.....	118
Tabela 4.5 –	Variação da distorção harmônica total de tensão e corrente.....	118
Tabela 4.6 –	Elementos RLC do filtro utilizados na modelagem dos filtros em série....	120
Tabela 4.7 –	Fator de potência, por fase, no ponto de conexão dos filtros antes e após conexão dos filtros.....	123
Tabela 4.8 –	Variação do fator de potência, por fase.....	126
Tabela 4.9 –	Variação da distorção harmônica total de tensão e corrente, por fase.....	126
Tabela 4.10 –	Resumo dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens modelados.....	128
Tabela 4.11 –	Fator de potência, por fase, no ponto de conexão dos filtros após a conexão dos filtros de 3ª ordem.....	137
Tabela 4.12 –	Variação do fator de potência, por fase.....	141
Tabela 4.13 –	Variação da distorção harmônica total de tensão e corrente, por fase.....	142
Tabela 4.14 –	Resumo dos filtros de 3ª, 9ª série modelados.....	144
Tabela 4.15 –	Fator de potência, por fase, no ponto de conexão dos filtros após a conexão dos filtros de 3ª e 9ª ordens.....	149
Tabela 4.16 –	Resumo dos filtros de 3ª, 9ª série e 3ª e 5ª ordens derivação modelados...	152
Tabela 4.17 –	Variação do fator de potência, por fase.....	160
Tabela 4.18 –	Variação da distorção harmônica total de tensão e corrente, por fase.....	160
Tabela 4.19 –	Resumo dos filtros de 3ª ordem em série harmônica modelados.....	162
Tabela 4.20 –	Fator de potência, por fase, no ponto de conexão dos filtros após a conexão do filtro de 3ª ordem.....	167
Tabela 4.21 –	Variação do fator de potência, por fase.....	170
Tabela 4.22 –	Variação da distorção harmônica total de tensão e corrente, por fase.....	170
Tabela 4.23 –	Quadro resumo dos tipos de filtros considerados e resultados obtidos com a simulação.....	174

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O cenário da energia elétrica tem sofrido grandes mudanças ao longo dos últimos anos, tendo em vista a inserção de cargas com características distintas daquelas do passado sob o ponto de vista de sensibilidade a distúrbios da qualidade de energia. Estas cargas vêm mudando o perfil do sistema elétrico rapidamente, consoante com o desenvolvimento tecnológico em que estão inseridos. No passado havia equipamentos robustos, quase sempre eletromecânicos. Com o passar dos anos e com o desenvolvimento de equipamentos baseados nos princípios da eletrônica, o termo “*Qualidade da Energia Elétrica - QEE*” adquiriu uma importância “*sui generis*”.

Assim, no contexto geral dos sistemas de energia elétrica, os fenômenos relacionados à qualidade da energia elétrica, têm se tornado preocupante tanto para as concessionárias, como também, para os consumidores. Fato este devido ao nível de esclarecimento dos mesmos no que diz respeito a seus direitos e também do aprimoramento da legislação pertinente ao assunto, que impõe multas e ressarcimento aos danos causados a equipamentos pela qualidade da energia comprometida que os alimenta.

A partir destes fatos, tornou-se necessário conhecer novos parâmetros de referência da energia elétrica fornecida de uma maneira diferenciada. Neste aspecto, os referidos

parâmetros de qualidade da energia suprida aos consumidores, que antes não tinham grande importância, e nem eram avaliados pelas concessionárias e pelos consumidores, agora se tornaram pontos cruciais a serem analisados e avaliados.

Com o aumento das sensibilidades das cargas, os distúrbios da qualidade da energia podem fazer com que haja mau funcionamento, desligamentos, e até mesmo danos em equipamentos sensíveis, resultando em grandes prejuízos financeiros. Dentre os vários distúrbios da qualidade da energia, as distorções harmônicas têm sido um tema vastamente discutido e pesquisado, sempre com a preocupação de buscar alternativas para que seus efeitos sejam minimizados, já que, nos dias de hoje é imperativa a presença de tais distúrbios nas redes elétricas.

Dentre os problemas provocados pelas correntes harmônicas no sistema de distribuição, o que será objeto de estudo deste trabalho é o carregamento que existe no condutor neutro de sistemas de distribuição a quatro fios (3 fases e neutro) que alimentam cargas não lineares. Assim, o foco principal nesta dissertação será o estudo de configurações alternativas na filtragem destas correntes.

Na literatura, várias referências tratam de questões básicas a respeito das correntes harmônicas, trazem sua definição, discutem a terminologia usada, levantam as causas e efeitos do referido distúrbio. Também discutem quais cargas são mais sensíveis a esse tipo de distúrbio, e quais são os níveis de distorção que afetam estas cargas [1, 2, 3,4].

Muitos trabalhos discutem o problema das distorções harmônicas e como solucioná-lo. Neste aspecto, existe um consenso tal que, para se estudar o problema e tentar reduzir o impacto causado a uma determinada carga sensível, é fundamental que se tenha informações referentes aos aspectos construtivos da carga, configurações e parâmetros do sistema em que a carga está conectada, tais como: níveis de curto-circuito, impedâncias das linhas de

distribuição, dados dos transformadores à montante e à jusante, e níveis de distorção harmônica tanto de tensão quanto de corrente do local de interesse.

Os trabalhos referentes às correntes harmônicas não são recentes, porém muitos conceitos ainda não estão totalmente consolidados, de forma que ainda existe muito espaço para discussão, objetivando-se chegar a um denominador comum sobre tal distúrbio.

1.2 - OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é a proposição de cinco tipos de configurações utilizadas para minimizar o carregamento do condutor neutro devido ao fluxo de correntes de sequência zero neste condutor. Para isto, esta análise engloba fatores principais como:

- Os princípios operativos das configurações, descrevendo como é desenvolvida a operação de filtragem das correntes;
- Implementação computacional dos filtros e simulação destes em condições ideais, em um sistema com cargas lineares, porém equilibrado, e acoplados a um sistema complexo não ideal, de forma a comparar a atuação dos filtros no dois sistemas;
- Conclusões gerais e comentários finais sobre os filtros analisados, discutindo suas vantagens e desvantagens, no que diz respeito à sua operação e desempenho.

Além disso, através deste estudo pretende-se mostrar a eficiência do programa *ATP* para simulação de sistemas de distribuição em regime permanente, no domínio do tempo, já que os problemas de distorção harmônica são classificados como problemas em regime permanente.

1.3 - RELEVÂNCIA

Pode-se dizer que os problemas causados pelas distorções harmônicas são um dos mais importantes e mais antigos fenômenos estudados na área da qualidade da energia. Tais fenômenos provocam efeitos em consumidores nas áreas residenciais, comerciais e industriais, e pode significar gastos de milhões de reais por ano, tanto em investimentos para a mitigação dos efeitos das distorções, quanto em perdas de energia e ressarcimento, este último sob a óptica da concessionária de energia elétrica. Nos Estados Unidos e na Europa, por exemplo, o custo estimado para a implementação dos limites propostos pela IEC seria da ordem de \$ 34Bi/ano em 2001 [5].

Os principais fatores que tornam o fenômeno “*distorção harmônica*” cada vez mais relevantes são:

- A crescente preocupação com a qualidade da energia visando à satisfação do cliente e a competitividade do mercado de energia;
- A utilização cada vez mais intensa de equipamentos “poluidores”, muitas vezes sensíveis à poluição externa e/ou à própria poluição gerada (computadores, controladores lógicos programáveis, acionadores de velocidade variável, lâmpadas fluorescentes compactas, entre outros.).

Diante dos fatos apontados, há uma necessidade de se avaliar a qualidade da energia entregue pelas concessionárias, levantar a verdadeira sensibilidade dos equipamentos ao distúrbio em questão (distorções harmônicas), bem como uma análise econômico-financeira dos efeitos causados por estes distúrbios.

De posse destas informações, as medidas de mitigação do distúrbio podem ser avaliadas com mais subsídios pela concessionária, por parte do consumidor e também por parte dos fabricantes de equipamentos eletro-eletrônicos envolvidos.

Neste contexto, a discussão que foi levantada acerca das configurações que serão analisadas nos capítulos subseqüentes, e suas respectivas implementações computacionais objetivam contribuir para o trabalho de melhoria da qualidade da energia elétrica e a redução das perdas causadas pelo distúrbio em questão.

1.4 - METODOLOGIA

Numa pesquisa junto à concessionária de energia elétrica ESPÍRITO SANTO CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. – ESCELSA do Espírito Santo, foram obtidos dados reais, tanto a respeito dos esquemas típicos dos sistemas de distribuição rural, de um alimentador de 13,8 kV, suprido por um transformador, como também de resultados de medições realizadas neste transformador, evidenciando o problema do carregamento do neutro deste, tendo em vista a configuração estrela aterrado no lado de 13,8 kV. Maiores detalhes sobre a configuração estudada serão vistos no capítulo IV.

A modelagem do sistema teste utilizado no capítulo III e a carga utilizada nessa etapa do trabalho foram realizadas de forma a possibilitar que os parâmetros calculados dos filtros pudessem ser verificados, com o objetivo de serem avaliadas todas as cinco estruturas que foram contempladas nesta dissertação. A sistemática adotada no decorrer das investigações foi baseada na verificação dos sinais de tensões de fase e correntes de linha, no ponto de conexão dos filtros e na saída do alimentador, onde o transformador está conectado.

1.5 – CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA DISSERTAÇÃO

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 à esclarecer o funcionamento dos equipamentos mitigadores de correntes harmônicas utilizando dispositivos eletromagnéticos e passivos LC sintonizados:

- Projeto e modelagem computacional dos filtros contemplados nesta dissertação, objetivando verificar seus comportamentos nos sistemas aéreos de distribuição;
- Escolha de um filtro para correntes de seqüência zero a ser utilizado para minimizar o fluxo de correntes de seqüência zero em sistemas aéreos de distribuição;
- Caracterização dos fatores de influência que determinam a eficácia do processo de filtragem harmônica das estruturas consideradas na pesquisa.

1.6 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

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

Capítulo II – Considerações gerais sobre correntes harmônicas em sistemas de potência.

Este capítulo tem por objetivo a contextualização no que tange aos distúrbios da qualidade de energia no passado e nos dias de hoje, posteriormente é feita uma discussão sobre a atual legislação, caracterização das distorções harmônicas, classificação das cargas geradoras de correntes harmônicas. Os efeitos ocasionados pelas distorções harmônicas de tensão e corrente, também foram contemplados nesta etapa do trabalho, de forma superficial, juntamente com a particularidade das correntes de sequência zero. Finalmente, trabalhos correlatos em dispositivos de filtragem harmônica foram considerados nesse capítulo.

Capítulo III – Modelagem e implementação computacional dos filtros de sequência zero em sistema teste.

Este capítulo objetivou a modelagem e a implementação computacional dos filtros contemplados nesta dissertação. As rotinas de cálculo para a determinação dos parâmetros dos filtros foram desenvolvidas neste capítulo, em consonância com as referências utilizadas. A implementação computacional foi realizada em um sistema teste, contendo tensões de alimentação e cargas não lineares equilibradas. O desempenho dos filtros foi discutido nesta etapa, usando o sistema teste implementado.

Capítulo IV – Avaliação do desempenho de filtros harmônicos passivos LC e eletromagnéticos na minimização de correntes de seqüência zero em sistemas aéreos de distribuição.

O desenvolvimento deste capítulo destinou-se a apresentar os resultados da aplicação dos filtros modelados no capítulo III em um sistema de distribuição aéreo real, modelado no *ATP*. Adicionalmente, cada estrutura foi avaliada, de forma a evidenciar suas vantagens e desvantagens em sua aplicação.

Capítulo V – Conclusões finais.

Por fim, a apresentação das principais discussões e conclusões gerais dos capítulos que formam o corpo desta dissertação foi destacada nesta fase final do trabalho. Além disso, foram ressaltadas questões para futuros desenvolvimentos.

Revisão bibliográfica de trabalhos correlatos.

CAPÍTULO II

CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE CORRENTES HARMÔNICAS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os problemas de qualidade da energia elétrica sem dúvida sempre existiram nos sistemas elétricos desde que a corrente alternada foi usada para transmissão e distribuição de energia aos consumidores. Todavia, deve-se ressaltar que no passado estes se restringiam tão somente às oscilações na frequência do sistema e variações na amplitude da tensão, tendo em vista os arcaicos métodos de regulação empregados no sistema e alguns problemas isolados com correntes harmônicas causando problemas de compatibilidade eletromagnética entre transformadores e sistemas de telefonia em meados das décadas de 30 e 40 [1].

Somente após a década de 50, com o início da construção das primeiras grandes usinas hidrelétricas e linhas de transmissão no país, com o intuito de impulsionar o desenvolvimento da indústria brasileira, é que as oscilações de frequência foram acentuadamente reduzidas devido à interligação dos sistemas, oferecendo assim maior confiabilidade na operação do sistema como um todo.

No contexto geral dos sistemas de energia elétrica, os fenômenos relacionados à qualidade da energia elétrica têm se tornado um fator relevante tanto para as concessionárias, como também para os consumidores devido ao nível de esclarecimento dos mesmos no que

diz respeito a seus direitos e do aprimoramento da legislação, que impõe multas e ressarcimento aos danos a equipamentos provenientes da falta de qualidade da energia que os alimenta.

A melhoria na qualidade da energia elétrica tornou-se inevitável, tendo em vista a sensibilidade dos equipamentos eletroeletrônicos atualmente utilizados pelos consumidores. Neste sentido, normas e recomendações vêm sendo elaboradas de forma a nortear a operação das concessionárias objetivando disponibilizar aos consumidores um produto (energia elétrica) com as características regidas pela Resolução N°. 505, de 26 de Novembro de 2001 da ANEEL e com os padrões constantes no Sub-Módulo 2.2 e no Módulo 8 dos *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST* [2] que trata da Qualidade da Energia Elétrica.

As cargas que interferem na qualidade da energia são conhecidas normalmente como cargas elétricas não lineares ou cargas especiais, dentre as quais se pode citar aquelas que possuem como princípio operativo as chaves eletrônicas. Neste aspecto, como ilustração, a figura (2.1) ilustra a relação entre tensão *versus* corrente de cargas lineares e não lineares.

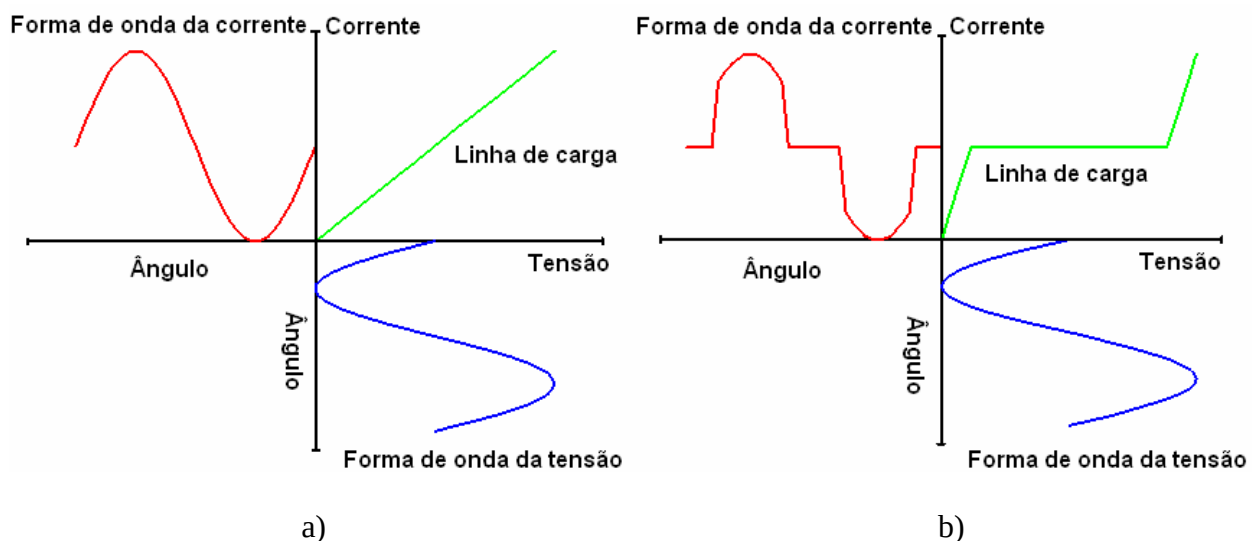


Figura 2.1 – Exemplo de relações entre uma tensão aplicada a uma carga *versus* sua corrente de carga: a) Carga linear; b) Carga não linear.

Tais cargas não lineares tiveram a sua maior difusão a partir da década de 80, com o desenvolvimento do parque industrial brasileiro, demandando assim maior otimização de seus procedimentos operacionais, entrando em operação equipamentos sofisticados tais como *Controladores Lógicos Programáveis – CLP's*, inversores e conversores de frequência e fontes chaveadas. Atualmente, com o estágio de desenvolvimento tecnológico dos equipamentos utilizados tanto nas indústrias quanto nas residências e comércios, os problemas de qualidade de energia não mais se restringem somente à área industrial. Devido à configuração utilizada em sistemas de distribuição, problemas com correntes harmônicas de sequência zero têm sido verificados e, desta forma, ações e pesquisas estão sendo realizadas para eliminar ou amenizar os efeitos destas correntes no sistema elétrico.

2.2 – DISTORÇÕES HARMÔNICAS – CONCEITOS GERAIS

As distorções nas formas de onda da corrente e da tensão dos sistemas elétricos estão relacionadas principalmente à injeção de correntes harmônicas geradas pelas cargas elétricas não lineares ou por alguma outra situação, a exemplo da injeção de correntes harmônicas devido à saturação de transformadores operando com baixo carregamento. Os níveis das tensões e correntes harmônicas injetadas nos sistemas de energia podem ser quantificados matematicamente baseando-se no estudo das ondas não senoidais periódicas, através da série de *Fourier* ou pela transformada de *wavelet*.

Sabe-se que aplicando a série de *Fourier* em uma onda distorcida de tensão ou corrente, obtém-se uma componente da onda com a frequência fundamental e outras componentes com frequências múltiplas da fundamental, denominadas por frequências harmônicas.

A aplicação da série de *Fourier* também propicia a vantagem de uma análise individual de cada componente harmônica que compõe a forma de onda distorcida, obtendo-se a amplitude, frequência e defasagem angular de cada componente que se deseja analisar. A título de ilustração, a figura (2.2) mostra a forma de onda da corrente de linha de um retificador monofásico e o seu espectro de frequências correspondentes, obtido pela aplicação da transformada discreta de Fourier.

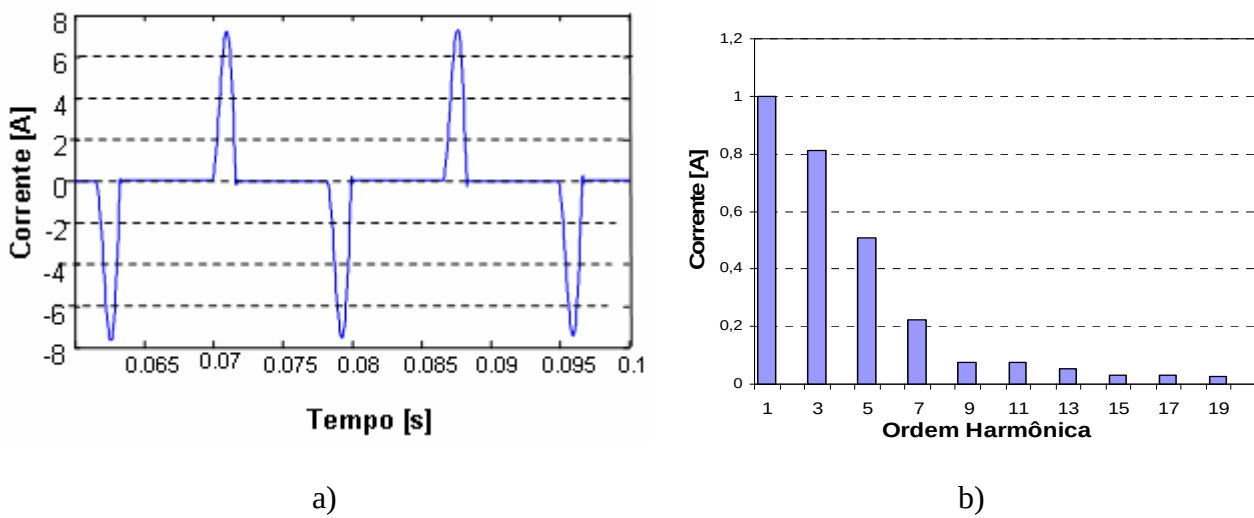


Figura 2.2 – Corrente típica de um retificador monofásico: a) Corrente de fase; b) Espectro harmônico correspondente.

Desta forma, para a quantificação das distorções harmônicas de tensão e corrente podem ser usadas expressões que informam o quanto o sinal está distorcido [2]. Estas expressões são denominadas de “*Distorção harmônica total de tensão – DTT%*” e “*Distorção harmônica de corrente – DTI%*”. Adotando as convenções utilizadas em [2,3] as equações (2.1) e (2.2) sintetizam tais definições:

$$DTT = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}{V_1^2}} \times 100(\%) \quad (2.1)$$

$$DTI = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}{I_1^2}} \times 100(\%) \quad (2.2)$$

Onde:

DTT = Distorção harmônica total de tensão percentual;

DTI = Distorção harmônica total de corrente percentual;

V_h = Valor eficaz da tensão de ordem n ;

I_h = Valor eficaz da corrente de ordem n ;

V_1 = Valor eficaz da tensão fundamental;

I_1 = Valor eficaz da corrente fundamental;

h = Ordem harmônica.

$h_{\max}$ = Ordem harmônica máxima utilizada no estudo.

Para a determinação do percentual de cada componente harmônica em relação à componente fundamental da onda, ou seja, a distorção harmônica individual, utiliza-se as equações (2.3) e (2.4), descritas a seguir [2]:

$$DIT_h = \frac{V_h}{V_1} \times 100(\%) \quad (2.3)$$

$$DII_h = \frac{I_h}{I_1} \times 100(\%) \quad (2.4)$$

Onde:

DIT_h = Distorção harmônica individual de tensão de ordem h percentual;

DII_h = Distorção harmônica individual de corrente de ordem h percentual.

Outra particularidade relacionada às distorções harmônicas é a aleatoriedade com que estas aparecem nos sistemas de energia elétrica. Este fator é de grande importância para uma análise do conteúdo harmônico, uma vez que, torna-se mais interessante conhecer os níveis médios e a faixa de variação ocorrida durante um determinado período. Nestas condições, muitas vezes é necessária a utilização de tratamentos estatísticos para realização de uma análise dos fenômenos de distorções nas formas de ondas dos sistemas elétricos.

Assim, as distorções harmônicas geradas pelas cargas não lineares não implicam, necessariamente, em mau funcionamento dos equipamentos sensíveis acoplados perto de tais cargas perturbadoras, pois este efeito ocorre somente quando o nível da qualidade da energia é inferior aos níveis de compatibilidade das cargas sensíveis.

2.3 – CARGAS GERADORAS DE CORRENTES HARMÔNICAS

Na maioria das vezes, as cargas poluidoras (não lineares) também são sensíveis à poluição que elas mesmas e que outras cargas poluidoras próximas a ela geram. Estas cargas podem ser classificadas em três grupos básicos:

2.3.1 – CARGAS DE CONEXÃO DIRETA AO SISTEMA

Nesta categoria de cargas, pode-se mencionar:

- Transformadores alimentadores;
- Motores de corrente alternada;
- Compensadores estáticos tipo reator saturado;
- Fornos a arco voltaico;
- Máquinas de solda a arco elétrico;
- Circuitos de iluminação com lâmpadas de descarga; etc.

2.3.2 – CARGAS CONECTADAS ATRAVÉS DE CONVERSORES

Neste grupo enquadram-se:

- Fornos de indução de alta frequência;
- Motores síncronos controlados por cicloconversores;
- Processos de eletrólises através de retificadores não controlados;
- Motores de indução controlados por inversores com comutação forçada;
- Motores de corrente contínua controlados por retificadores; etc.

2.3.3 – CARGAS RESIDENCIAIS

Pode-se citar nesta categoria de cargas:

- Televisores;
- Sistemas de iluminação controlados por dimmers;
- Circuitos de iluminação com lâmpadas de descarga;
- Carregadores de baterias;
- Eletrodomésticos com fontes chaveadas;
- Computadores;
- Ar-condicionado; etc.

Assim, da classificação mostrada anteriormente, pode-se observar que a tendência é cada vez maior a conexão de cargas não lineares conectadas ao sistema, que poderão ser sensíveis às distorções harmônicas. É fato que, com o avanço tecnológico, a facilidade do acesso aos equipamentos listados por praticamente todas as classes sociais e, também ultimamente, o crescimento da construção de edificações inteligentes com diversificadas finalidades, tem intensificado o fluxo de correntes harmônicas em todos os níveis dos sistemas de distribuição, podendo até mesmo vir a interferir no desempenho de sistemas de transmissão.

2.4 – EFEITOS DA DISTORÇÃO HARMÔNICA NO SISTEMA ELÉTRICO

Como discutido no subitem 2.2, a simples ocorrência de distorções harmônicas não implica necessariamente em problemas. Portanto, o problema está no fluxo das correntes harmônicas através das impedâncias envolvidas, gerando assim tensões distorcidas. Esta afirmativa é consoante com a verificação de distorções relativamente baixas em subestações e plantas de geração comparadas com os locais onde existem cargas não lineares instaladas e adjacências. Isto se deve ao fato de que nestes locais, os níveis de curto-circuito são elevados, conseqüentemente, a impedância de curto-circuito nestes locais é baixa, ocasionando um produto $Z(h) \times I(h)$ de baixo valor. Neste aspecto, para uma melhor compreensão deste fato, a figura (2.3) ilustra o problema das distorções harmônicas de tensão, decorrente do fluxo de correntes harmônicas pela impedância do sistema.

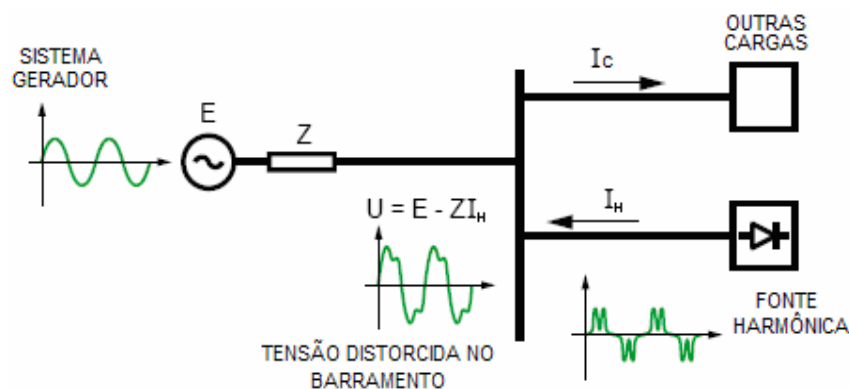


Figura 2.3 – Fluxo convencional de correntes harmônicas no sistema de potência

Portanto, da figura acima, observar-se que a tensão distorcida no barramento, originária da interação entre a tensão do sistema E e a tensão harmônica ZI_h , pode atingir valores proibitivos, com base na legislação existente. Pode-se dizer seguramente que cuidados

devem ser tomados, principalmente na fase de projeto de equipamentos e sistemas, de forma a minimizar os efeitos das correntes harmônicas nestes, tendo em vista a inevitável presença de equipamentos baseados em tecnologia não linear nas redes elétricas.

Considerando-se os equipamentos acoplados no sistema elétrico e suas características, verifica-se que é possível classificar os efeitos das distorções harmônicas em três grupos:

- I. **Solicitações de isolamento (dielétricas):** Devido às distorções de tensão;
- II. **Solicitações térmicas:** Devido à circulação de correntes harmônicas;
- III. **Operação indevida de equipamentos:** Devido a torques oscilatórios, de relés, etc.

Considerando a classificação acima e o comportamento físico de alguns dispositivos constituintes do sistema elétrico frente as condições não lineares de tensão e corrente, serão discutidos a seguir os efeitos das distorções harmônicas em equipamentos considerados de maior relevância.

2.4.1 – EFEITOS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS SOBRE A RESISTÊNCIA DE CONDUTORES ELÉTRICOS

É de conhecimento que quando uma corrente percorre um condutor este fica submetido a dois fenômenos: o efeito pelicular e o efeito proximidade. O resultado é o aumento das perdas elétricas nos condutores. O fato já existe à frequência industrial, apesar de aparentemente não ser levado em conta, uma vez que o mesmo já é incorporado nas tabelas de dimensionamento dos fabricantes.

Como se sabe, o efeito pelicular é o resultado da não uniformidade da indutância própria através das secções retas do condutor. Esta não uniformidade da corrente faz com que a resistência CA se apresente alterada com um maior valor [4, 6].

No efeito proximidade, os campos magnéticos dos condutores próximos se interagem distorcendo a distribuição das correntes nos mesmos, e consequentemente, alterando o valor da resistência elétrica.

Existem várias formas de se tratar com os fenômenos acima descritos, sendo que a maneira mais prática é através da utilização de tabelas para determinação de fatores de correção para o dimensionamento das bitolas dos condutores que serão utilizados na avaliação.

Por fim, deve-se sempre prever a circulação de correntes harmônicas em instalações onde haverá a utilização de um grande número de equipamentos eletrônicos, tais como naquelas instalações de natureza comercial.

2.4.2 – EFEITOS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS NOS MOTORES DE INDUÇÃO

Em geral, se a distorção harmônica total de tensão (*DTT*), não exceder a 5% e, se nenhuma harmônica individual de tensão ultrapassar a 3%, então não haverá necessidade de fazer a sub-utilização (*derating*) do motor. Para o caso em que os motores apresentam excessivo aquecimento, isto significa dizer que o *DTT* atingiu níveis de 8% a 10% [1].

A influência das correntes harmônicas sobre os motores de indução também se manifesta sobre o torque e as perdas internas. Se as distorções harmônicas totais de corrente

não excederem a 20%, os efeitos provocados ao motor por estas correntes não terão um impacto muito significativo.

Para uma avaliação mais adequada, há de se salientar aqui a necessidade de um estudo detalhado sobre as perdas no ferro, decorrentes do efeito pelicular e do efeito proximidade nos condutores do estator, podendo o aumento destas perdas propiciar uma redução acentuada da vida útil do equipamento.

Os torques oscilatórios podem gerar problemas de vibrações mecânicas no motor e para a carga acionada, resultando em avarias para o sistema de rolamentos tanto para o motor quanto para a carga acionada, caso esta disponha de rolamentos [7].

Além das questões supracitadas, os motores de indução que estão sujeitos a tensões distorcidas poderão ainda apresentar problemas operacionais como alterações das condições de partida, nos pontos de operação em regime permanente, variações do torque médio, entre outros.

2.4.3 – EFEITOS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS SOBRE TRANSFORMADORES

As falhas nos transformadores geralmente estão associadas a problemas na isolação do equipamento. Assim, quanto maior a temperatura a que a isolação estiver submetida, maior será a sua deterioração. A degradação de algumas propriedades do sistema isolante é resultado da ação individual e/ou conjunta de algumas possibilidades tais como: calor, força mecânica, redução da resistência dielétrica devido especialmente às sobretensões, contaminação, umidade e acidez do óleo isolante, vibrações mecânicas, ambientes corrosivos, entre outros.

Portanto, o carregamento de um transformador está diretamente vinculado à sua temperatura de operação, que, por sua vez, influi sobre a expectativa de vida útil do equipamento.

Um dos principais efeitos das componentes harmônicas em transformadores manifesta-se na forma de sobre aquecimento devido ao aumento das perdas joule e no ferro (Histerese e Foucault). Sabe-se que a presença das componentes harmônicas, além do efeito das correntes propriamente ditas, também provocam o aumento da resistência dos enrolamentos, como tratado no sub-índice 2.4.1, contribuindo para o acréscimo das perdas i^2r .

Tendo em vista a correlação entre aquecimento do equipamento e a sua vida útil, é adequado retratar este relacionamento matematicamente, de forma a expressar a estimativa de perda de vida útil com o aumento da temperatura de funcionamento do equipamento. A expressão utilizada para tal finalidade é derivada da teoria clássica de Arrhenius-Darkin e foi utilizada em [8]. A equação (2.5) mostra, portanto, que a isolação tem longa durabilidade se a temperatura for mantida abaixo de certo limite, acima do qual a vida útil é afetada à medida que a temperatura é aumentada. Pode-se então escrever:

$$EVu = D.d^{\left(\frac{A}{\theta}+C\right)} \quad (2.5)$$

Onde

A, C e D – são constantes do material isolante;

θ – temperatura do material isolante [°K];

d – valor constante (10 ou $e = 2,71828$)

EVu – expectativa de vida útil [horas]

Com o uso e aplicação da expressão, a tabela (2.1) mostra como se comporta a redução da vida útil de um transformador em função do aumento adicional de temperatura, de acordo com a equação (2.5) [7]. Partindo-se da equação (2.5) é possível, após ajustes, a obtenção da expressão (2.6), conforme a norma NBR 5416, dada por:

$$EVu(h) = 10^{\left[\frac{6972,15}{\theta + 273} - 14,133 \right]} \quad (2.6)$$

Tabela 2.1 – Redução da vida útil do transformador em função do aumento adicional de temperatura

$\Delta\theta [^{\circ}C]$	Vu [horas]	Redução [%]
0	65.000	0
1	57.772	11
2	51.363	21
3	45.693	30
4	40.676	37,42
5	36.232	44,25
6	32.294	50
7	28.800	55,7

Da tabela (2.1) pode-se verificar que, para pequenos aumentos de temperatura há sensíveis reduções da vida útil, chegando-se a uma diminuição de aproximadamente 50% para um aumento adicional de 6 [°C]

Novamente, com base na equação (2.6), a tabela (2.2) fornece a elevação da vida útil em função da redução da temperatura ambiente. Como exemplo desta situação de diminuição de temperatura ambiente pode ser citado o funcionamento dos sistemas de ventilação forçada aplicado aos transformadores de força de subestações.

Tabela 2.2 – Elevação da vida útil em função da diminuição de temperatura

$\Delta\theta [^{\circ}C]$	Vu [horas]	Elevação [pu]
0	65.000	0
5	118.584	1,82
10	219.700	3,38

Os efeitos descritos até aqui são apenas uma pequena amostra de como as distorções harmônicas interferem no funcionamento de alguns equipamentos. Deve-se ressaltar também a influência de tais distorções sobre os geradores síncronos [9], sobre os capacitores para a correção do fator de potência, sobre cargas lineares e não lineares, disjuntores, fusíveis, dispositivos de proteção e medição e sobre o fator de potência, assuntos estes que fogem aos objetivos desta dissertação.

No que tange à correção do fator de potência, sabe-se que o dimensionamento dos bancos de capacitores considera-se tão somente a componente da corrente fundamental. Constantemente esta ação leva a danos frequentes às instalações dos capacitores, no que diz respeito à danificação das unidades capacitivas devido à ocorrência da ressonância entre o capacitor e a indutância do sistema à montante no ponto de conexão do capacitor.

Portanto, com a presença de correntes e tensões harmônicas o já consagrado co-seno do ângulo entre a tensão e a corrente não pode mais ser assim chamado, vulgarmente, de fator de potência [10], necessitando neste contexto da inserção de novos conceitos, a exemplo do fator de potência com distorção.

Outra situação a ser considerada é que em sistemas de distribuição é inevitável que haja um desequilíbrio considerável entre as correntes do sistema, devido, principalmente pela conexão de cargas monofásicas ou bifásicas no sistema trifásico. Em sistemas com estas características onde há a configuração trifásica a quatro fios, ou seja, com configuração delta/estrela com centro estrela aterrado, a diferença entre as correntes irá circular pelo neutro.

A magnitude desta corrente de circulação pelo neutro é monitorada pela unidade 51N (relé de corrente) nos níveis de 15kV dos sistemas de distribuição, que geralmente comanda a abertura de um disjuntor caso seja detectada um valor de corrente acima da corrente de ajuste da unidade, evitando que o transformador seja danificado ou tenha a sua vida útil

comprometida com o aumento de temperatura que essa corrente excessiva de neutro poderia provocar, conforme considerado anteriormente.

2.5 – PARTICULARIDADES DAS CORRENTES DE SEQUÊNCIA ZERO

Quando o transformador alimenta cargas não lineares correntes harmônicas circulam pelos condutores das fases e do neutro (ao se considerar a existência deste), e estas estando presentes em sistemas elétricos por si só já demandam uma preocupação extra em sua operação. Neste sentido, quando do sistema em configuração com centro estrela aterrado, as correntes harmônicas de sequência zero, a exemplo das harmônicas de 3º ordem e suas múltiplas podem causar sobrecargas no condutor neutro [10]. Isto se deve ao fato que estas componentes se somam no neutro, podendo atingir valores superiores á corrente de linha. Para ilustrar a presença desta corrente, o sistema da figura (2.4) foi simulado. O arranjo mostrado na figura consiste de três retificadores monofásicos conectados em estrela aterrada, composto por um uma ponte retificadora com capacitor de alisamento de 15uF, e como carga uma resistência de $14,8\Omega$ e uma indutância de 0,1 H.

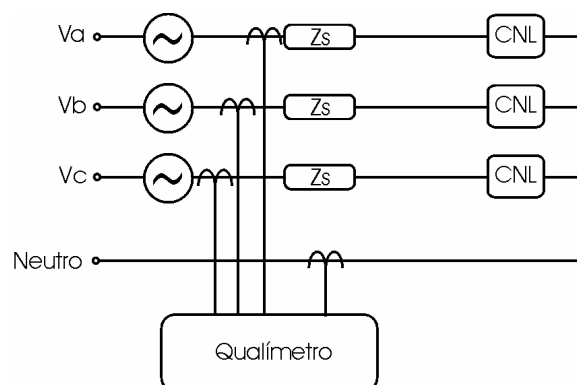


Figura 2.4 – Sistema teste simulado para medição da corrente no condutor neutro.

O sistema acima é, portanto, composto por três cargas não lineares (CNL) equilibradas, de forma que não existirá corrente fundamental no neutro. A impedância do sistema (ZS) foi levada em consideração, com valores de resistência de $0,01 \, \Omega$ em série com uma indutância de $0,1 \, \text{mH}$.

As figuras (2.5) e (2.6) mostram as formas de onda da corrente de linha da fase e da corrente de neutro, respectivamente, obtidos na simulação.

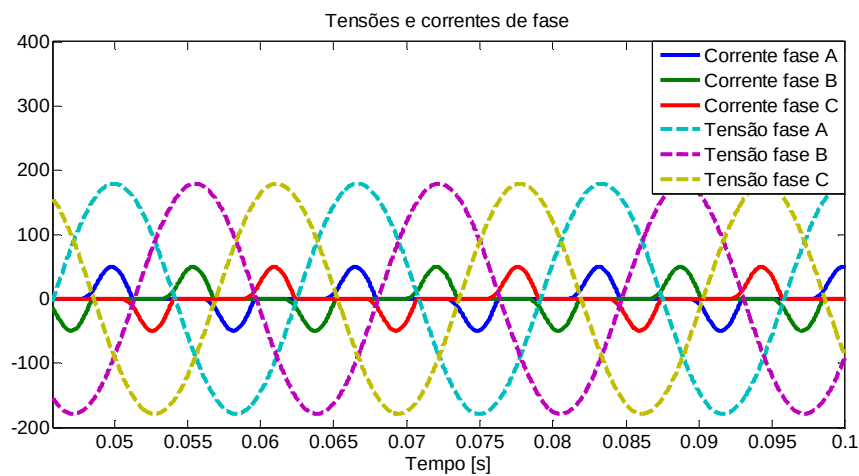


Figura 2.5 – Tensões e correntes de fase do sistema da figura 2.4.

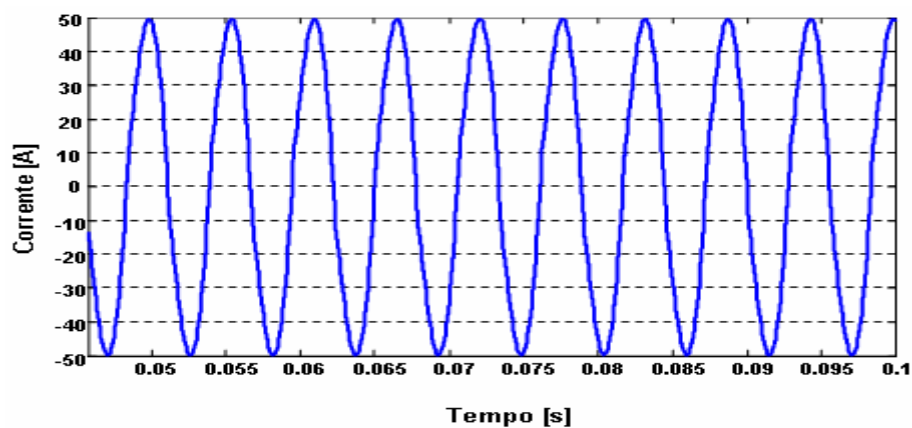


Figura 2.6 – Corrente no condutor neutro do sistema da figura 2.4.

Como pode ser observado na figura (2.7), a frequência da corrente resultante do neutro é de ordem três, ou seja, a terceira harmônica é a predominante, tendo em vista o equilíbrio

das cargas. Na mesma figura é mostrado o espectro harmônico correspondente, onde fica clara a questão da soma das componentes de seqüência zero no condutor neutro, e também individualmente as correntes nas fases A, B e C.

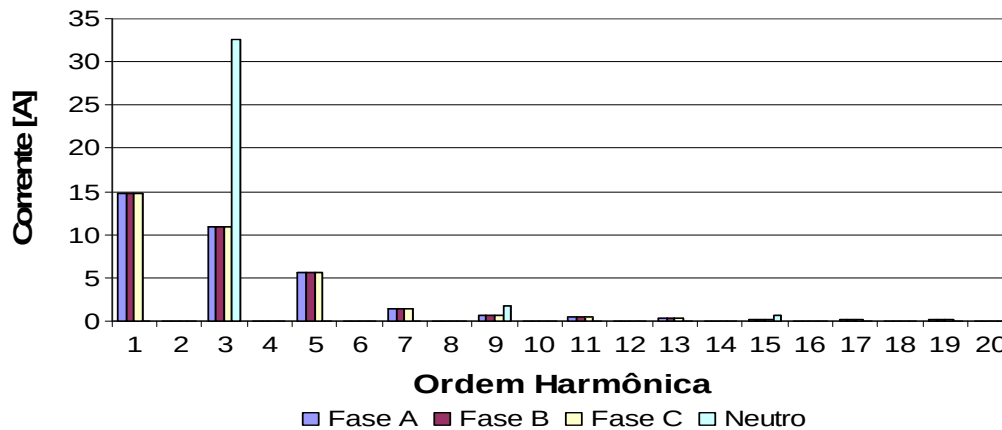


Figura 2.7 – Espectro harmônico das correntes de fase e de neutro.

Para um sistema trifásico, simétrico e equilibrado, a corrente existente no condutor neutro deveria ser zero, com isso a seção do condutor neutro poderia ser menor, comparada com a do condutor fase. No entanto, como pode ser visto na figura (2.7), existe a circulação de uma corrente que é maior que o dobro da corrente de fase circulando pelo condutor neutro.

Muito embora a tônica das discussões tenha sido orientada para o caso de sistemas não senoidais trifásicos equilibrados, vale ressaltar que as componentes de seqüência zero podem ser ainda incrementadas quando do funcionamento de instalações trifásicas em que a rede e/ou a carga se apresentam desequilibradas. Nestas situações, além das denominadas componentes de seqüência múltiplas de três, há de se reconhecer que as demais freqüências podem também produzir componentes de seqüência com características da seqüência zero aqui considerada. Caso isto aconteça, o fenômeno da circulação de correntes harmônicas pelo neutro fica fortalecido, sem contar ainda com a freqüência fundamental que também poderá existir.

Com vistas a solucionar os problemas que essa corrente provoca, algumas soluções podem ser tomadas, tais como aumento da seção do condutor neutro, instalação de um condutor neutro para cada fase, instalação de um condutor neutro adicional (duplicação), instalação de filtros harmônicos de seqüência zero junto a cada carga, instalação de transformadores isoladores, entre outros.

2.6 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE TRABALHOS CORRELATOS

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 levantamento bibliográficos realizado.

Neste contexto, é possível encontrar diversas técnicas para reduzir os sinais harmônicos de tensão e/ou corrente. Tais técnicas, de um modo geral, podem ser agrupadas em topologias abaixo descritas:

- Uso de filtros passivos conectados em paralelo e/ou série [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20];
- Inserção de reator em série com a linha c.a. [21, 22];
- Uso de dispositivos eletromagnéticos [23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31];
- Filtros ativos de potência conectados em paralelo e/ou série [32, 33, 34, 35, 36, 37];
- Técnicas de compensação de fluxo magnético [38, 39]

A escolha de um ou outro procedimento, ou mesmo a associação de soluções, deve levar em consideração a análise de alguns aspectos, tais como:

- 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;
- Tipos de cargas instaladas, potência envolvida, problemas ocasionados por harmônicas;
- Ponto onde será instalado o dispositivo redutor de harmônicas;
- Desempenho e capacidade nominal do dispositivo;
- Relação entre custo inicial de compra mais o custo da energia consumida do próprio dispositivo *versus* custo evitado;
- 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 minimização das correntes harmônicas;
- Efeitos indesejáveis ao funcionamento das cargas elétricas envolvidas. Aumento da distorção de tensão de alimentação da carga, sua queda ou a sua elevação (efeitos da ressonância, no caso de filtros passivos);
- Efeitos danosos podem ocorrer sobre o sistema de alimentação, tais como alteração no nível de distorção harmônica de tensão ou de corrente, do nível de curto circuito, alterações no fator de potência, entre outros. Em decorrência desses, pode haver possíveis efeitos indesejáveis sobre cargas consumidoras adjacentes ao dispositivo mitigador;
- Alterações do sistema podem interferir no funcionamento do equipamento mitigador. Variações como alteração da impedância do sistema, aumento do fluxo das correntes harmônicas no sistema e desequilíbrios de tensão podem prejudicar o funcionamento do dispositivo.

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

Os filtros passivos são formados a partir de combinações de elementos resistivos, capacitivos e indutivos, podendo ser conectados em paralelo, série ou em associação entre ambos ao sistema elétrico. Aqueles conectados em paralelo (derivação ou *shunt*) têm sido largamente empregados. Ao longo de vários anos, devido a fatores científicos, tecnológicos e econômicos, estes têm se firmado como a solução mais viável para redução de harmônicos.

Os filtros passivos em derivação são também classificados conforme suas características de impedância com a frequência. Assim, estes filtros podem ser agrupados em duas categorias: filtros sintonizados e amortecidos.

Os filtros sintonizados são circuitos constituídos por elementos R, L e C em combinações série, paralela ou série-paralela. Nestes filtros, os elementos indutivos (L) e capacitivos (C) são determinados de tal forma que apresentem baixa impedância equivalente para as frequências que eles devem filtrar, ou seja, para as frequências ressonantes. Os filtros amortecidos são constituídos por circuitos que oferecem uma baixa impedância equivalente ao longo de uma larga faixa de frequências. Outra função dos filtros sintonizados e amortecidos é que, para frequências abaixo da frequência de ressonância, apresentam-se com impedância capacitiva, ou seja, operam como compensadores de reativo para a frequência fundamental.

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 [15]:

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

Os filtros passivos pela sua versatilidade, confiabilidade e relativa simplicidade foram os mais explorados neste trabalho. As configurações básicas dos filtros sintonizados em derivação (*shunt*) e série podem ser vistas nas figuras (2.8a) e (2.8b) respectivamente.

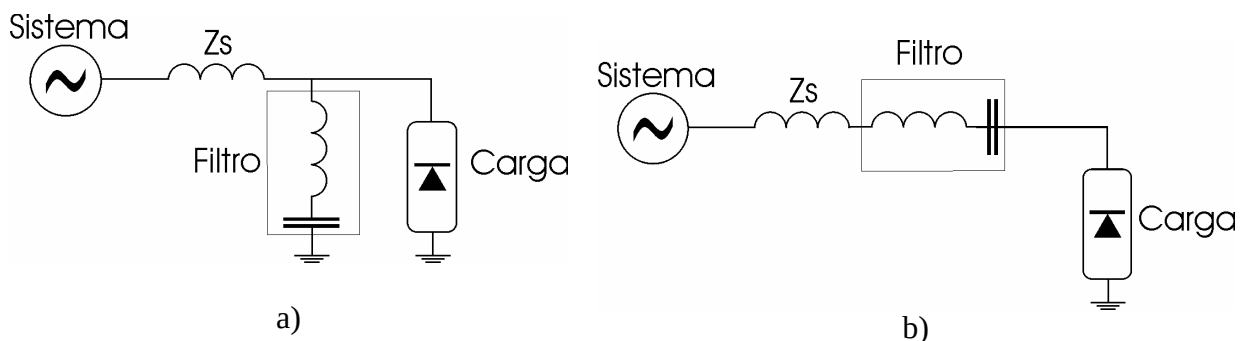


Figura 2.8 – Figura 2.8a) Filtro passivo em derivação com a carga. Figura 2.8b) Filtro passivo em série com a carga.

Uma alternativa para diminuir a distorção harmônica das correntes consiste na utilização de filtros ativos, constituídos por componentes baseados na tecnologia utilizada na eletrônica de potência, e de controles analógicos e/ou digitais de chaveamento e controle interno de tal dispositivo. Este tipo de dispositivo tem tido uma evolução bastante acentuada, predominantemente a partir da década de 80 com o crescente desenvolvimento da eletrônica de potência.

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 [40, 41].

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 [42]. Um filtro ativo paralelo típico é composto basicamente por um inversor de tensão ou de corrente, acionado por técnicas específicas de controle [35].

Como mencionado, a combinação de filtros ativos série/paralelo também se apresenta como um procedimento para o controle de harmônicas. Neste particular, a referência [43] 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*) [34]. Nesta mesma linha [44] propôs 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 [42, 45, 46].

De forma geral, a utilização de filtros ativos para o controle de distorções harmônicas de tensão e/ou corrente se apresenta como uma opção eficiente para tal fim, apresentando, porém, altos custos de implantação e manutenção, inviabilizando, em algumas situações, o uso dos mesmos.

Os filtros ativos não foram considerados neste trabalho, tendo em vista algumas desvantagens acima citadas, e pelo seu desenvolvimento relativamente complexo. As configurações acima citadas são mostradas na figura (2.9), (2.10) e (2.11).

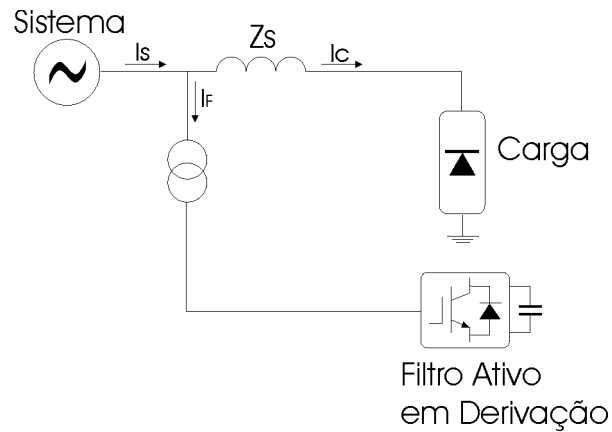


Figura 2.9 – Filtro ativo em derivação com a carga

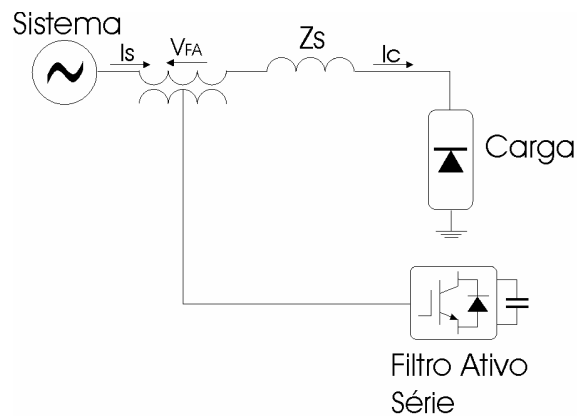


Figura 2.10 – Filtro ativo em série com a carga

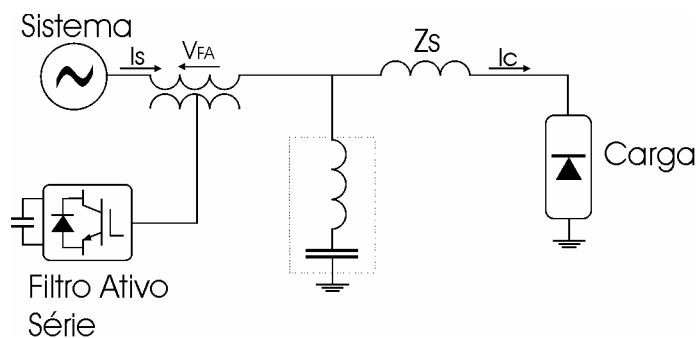


Figura 2.11 – Filtro ativo composto (híbrido).

Além dos filtros passivos, outra estrutura de compensação harmônica avaliada neste estudo é a que se baseia nos princípios eletromagnéticos, os quais também foram foco deste estudo. Mesmo não havendo uma quantidade grande de trabalhos sobre o assunto, algumas referências utilizadas tal como a [47] apresentam uma configuração do sistema de energia utilizando transformadores defasadores para a minimização do fluxo de correntes harmônicas de seqüência positiva, negativa e zero. 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. Na referência [48] é apresentada uma configuração para um filtro eletromagnético de seqüência zero, não apresentando, porém, maiores detalhes sobre construção e operação do dispositivo. Algumas referências trazem resultados computacionais e experimentais de sistemas utilizando dispositivos eletromagnéticos como filtros de correntes de seqüência zero [23, 25, 26, 27, 31]. Consoante com a filosofia dos dispositivos anteriormente descritos, as referências [24, 26] apresentam uma forma alternativa para a melhoria da eficiência do filtro de seqüência zero em derivação em questão, que consiste em uma estrutura magnética em série com a linha que alimenta a carga não linear, mas à montante do filtro em derivação, chamado de bloqueador de seqüência zero. A figura (2.12a) ilustra a topologia deste equipamento. O dispositivo em questão tem como objetivo aumentar a impedância de seqüência zero do sistema de alimentação vista pelo filtro em derivação, de forma a facilitar o trabalho do filtro em derivação em desviar as correntes de seqüência zero injetadas pela carga. Com vistas a descrever o funcionamento dos filtros de seqüência zero sob condições não ideais de suprimento ou carga não equilibrada alimentada, a referência [27] enfoca, computacionalmente, diferentes condições elétricas do sistema, tais como: carga não linear trifásica desequilibrada, carga não linear monofásica, tensão de alimentação desequilibrada e tensão de alimentação destorcida. Existem ainda enfoques sobre a filtragem de correntes de seqüência positiva e negativa utilizando dispositivos eletromagnéticos,

descritos nas referências [49, 50], mas estes não são objetos desta dissertação, de forma a ficar como proposta de trabalhos futuros, tendo em vista os benefícios que tais dispositivos trariam para o funcionamento do sistema como um todo.

Como ilustração, a figura (2.12a) mostra a configuração do transformador bloqueador de seqüência zero e na figura (2.12b) o transformador passante (provedor de caminho de baixa impedância para a corrente de seqüência zero). Estas duas estruturas são bastante citadas pelas referências utilizadas nesta dissertação.

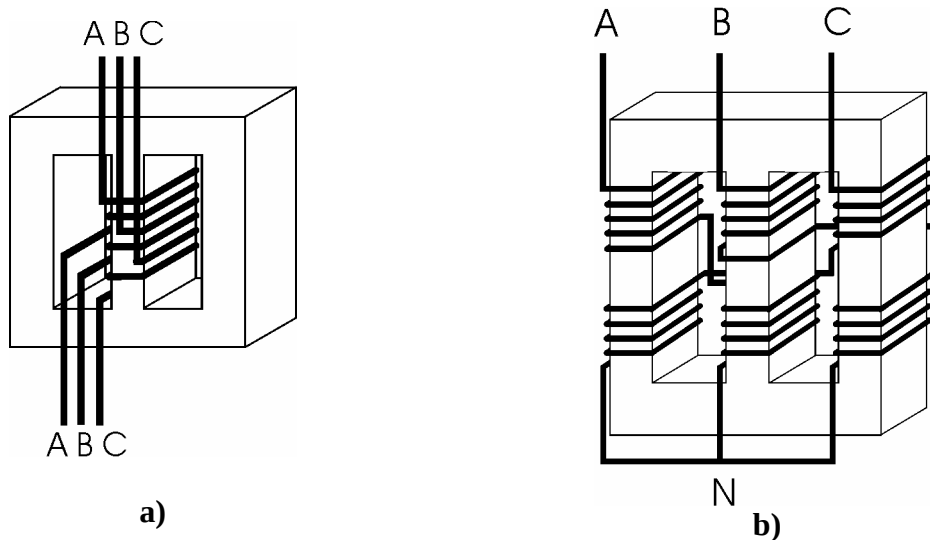


Figura 2.12 – Estruturas magnéticas utilizadas como filtros de seqüência zero. a) bloqueador eletromagnético de seqüência zero; b) transformador passante de correntes de seqüência zero.

A figura (2.12b) mostra a ligação equivalente de um transformador trifásico conectado em zig-zag. A ligação equivalente dos terminais primário e secundário deste transformador possibilitou a conexão resultante de um reator trifásico em zig-zag, o qual seria esta a nomenclatura mais utilizada. Entretanto, nesta dissertação tal equipamento será denominado, doravante transformador zig-zag.

2.7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo foi desenvolvido de forma a apresentar os conceitos básicos sobre qualidade da energia, correntes harmônicas, como estas são geradas e como elas afetam determinados equipamentos acoplados ao sistema elétrico. Adicionalmente, foi realizado comentários sobre os principais equipamentos presentes no sistema elétrico que são afetados pela presença de tensões e/ou correntes harmônicas. Uma introdução, apesar de sucinta, mas consistente acerca das particularidades das correntes de seqüência zero, gerando efeitos indesejáveis de diversas naturezas, objeto de investigações posteriores e que serão descritos nos capítulos a seguir desta dissertação.

CAPÍTULO III

MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DOS FILTROS DE CORRENTE DE SEQUÊNCIA ZERO EM SISTEMA TESTE

3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Estudos operacionais envolvendo componentes do sistema elétrico, sob condições de regime permanente ou transitório, da mesma forma que para qualquer fenômeno elétrico, podem ser realizados através da simulação digital. Este procedimento permite analisar o desempenho de dispositivos e sistemas elétricos, eletromagnéticos, mecânicos, eletrônicos, etc., sob variadas condições de operação, a custos relativamente baixos, sem a necessidade da construção de protótipos ou sistemas em escala reduzida, como eram realizadas no passado as simulações de fluxo de carga, por exemplo, minimizando os tempos de execução.

A partir dos anos 60, com o desenvolvimento de programas digitais, a exemplo do *EMTP – Electromagnetic Transient Program*, os procedimentos de simulações digitais se tornaram mais intensos. Com a constante modernização e crescimento dos sistemas a serem utilizados, pesquisas foram necessárias com vistas a melhorar o desempenho de tais programas. A título de exemplo, o *EMTP* na década de 60 só realizava simulações de sistemas monofásicos por meio de modelos de indutâncias, capacitâncias, resistências e linhas sem

perdas, que se utilizavam do método de Bergeron para serem modeladas, podendo ser incluída na simulação uma chave e uma fonte de excitação. Para a resolução das equações diferenciais não lineares era utilizado o método da integração trapezoidal.

Devido às facilidades mencionadas, para o desenvolvimento dessa dissertação foi utilizado como simulador digital o programa *ATP – Alternative Transient Program*, que nada mais é do que uma versão de distribuição livre do *EMTP*.

O uso programa *ATP* já é bastante difundido e consagrado, tanto no meio acadêmico/científico como também nas concessionárias de energia elétrica. Este *software* permite fazer simulações de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, no domínio do tempo, com configurações arbitrárias, por um método que utiliza a matriz de admitância de barras. Durante a solução das equações dos elementos utilizados no modelo do sistema são empregadas técnicas de esparsidade e de fatorização triangular otimizada de matrizes, o que permite que a solução no *ATP* seja encontrada muito mais rápida do que em seus antecessores.

O programa contém uma vasta biblioteca com modelos variados, tais como: resistores, indutores, capacitores, transformadores lineares ou não, chaves, fontes, etc. Por haver vários grupos de estudo internacionais desenvolvendo trabalhos no *ATP*, uma vasta bibliografia pode ser encontrada sobre o assunto [51].

3.2 – MODELAGEM COMPUTACIONAL DO SISTEMA TESTE

A modelagem adequada dos elementos constituintes do sistema que se deseja simular é de extrema importância para que se obtenham resultados confiáveis e realmente representativos do sistema físico real que o modelo busca representar.

Consoante com essa afirmativa, a modelagem computacional deve ser desenvolvida dentro dos mais criteriosos detalhes, de forma a serem obtidos resultados representativos e confiáveis para a modelagem dos componentes do sistema elétrico proposto.

Neste sentido, esta dissertação contempla a modelagem de cinco estruturas utilizadas como filtros de corrente de seqüência zero utilizadas em sistemas de distribuição. Para tal foi modelado um sistema teste que consiste em uma fonte trifásica, simétrica e equilibrada em condições ideais com tensões de 7,967 kV (fase-terra), impedâncias representando as impedâncias das linhas ($R=3,66 \, \Omega$ e $L=3,2 \, \text{mH}$), retificadores monofásicos constituídos por uma ponte retificadora com capacitor de alisamento de 15uF, alimentando uma impedância ($R=800 \, \Omega$ e $C=500 \, \mu\text{F}$), de forma a representar as cargas não lineares. Este arranjo está mostrado na figura (3.1).

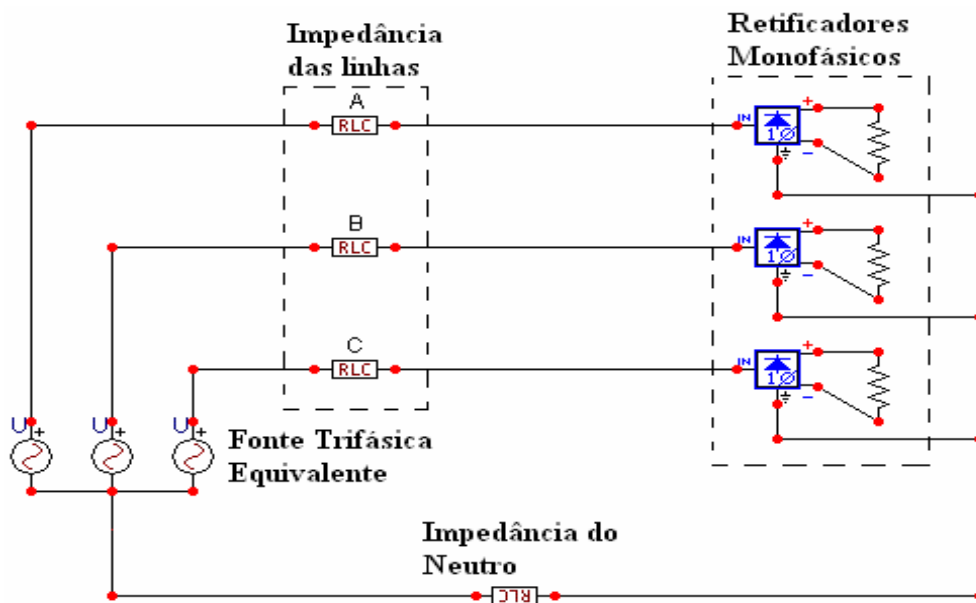


Figura 3.1 – Sistema teste para a modelagem e implementação computacional dos filtros utilizados nesta dissertação

As cargas foram configuradas e modeladas de forma a não existir corrente fundamental no neutro. Pelas características do conversor (retificador monofásico), e do

sistema teste utilizado, foi obtido o espectro harmônico de correntes de linha apresentando apenas correntes ímpares (1, 3, 5, 7, etc.), como pode ser visto na figura (3.2). Sobre esta figura, devido a simetria entre as fases, neste capítulo somente a fase A será considerada.

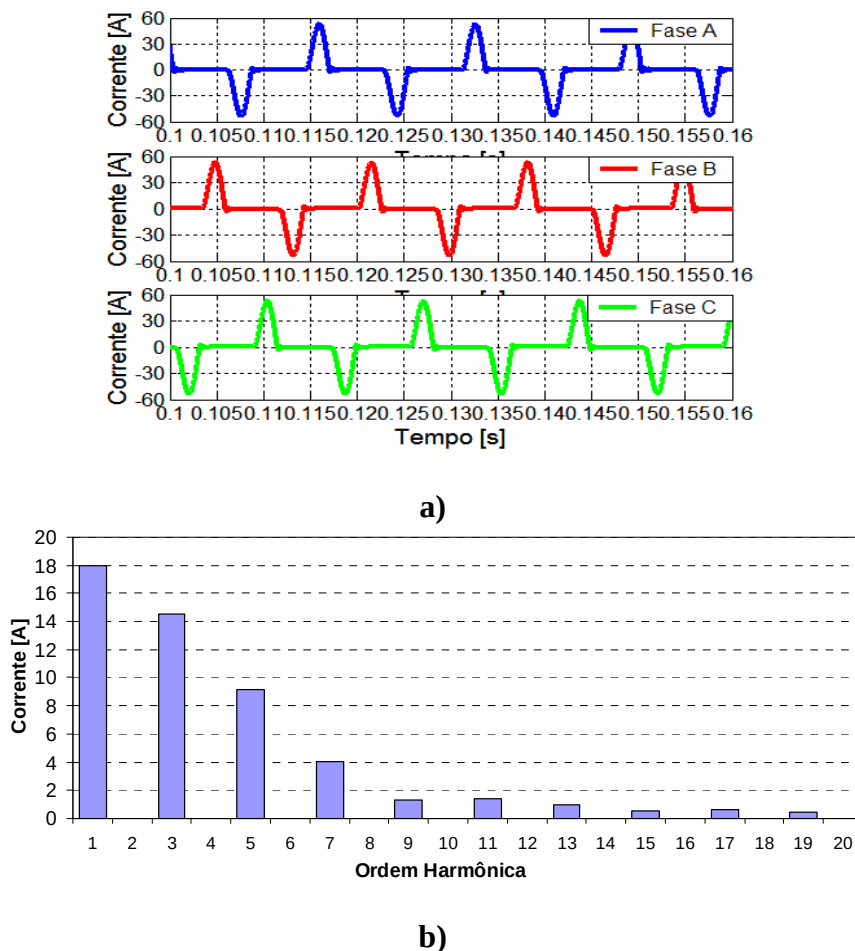


Figura 3.2 – a) Correntes de linha do sistema teste da figura 3.1; b) Espectro harmônico da corrente de linha A.

Por outro lado, a figura (3.3) mostra o espectro harmônico da corrente que circula no neutro do sistema da figura (3.1). Observa-se nesta figura que a referida corrente é composta por exclusivamente correntes de ordem 3 e suas múltiplas, o que vem ao encontro do exposto no capítulo anterior. Neste sentido, para um sistema que, a priori, foi concebido como sendo trifásico, simétrico e equilibrado, sendo alimentado com tensões ideais, a expectativa seria de que não houvesse corrente circulando pelo neutro.

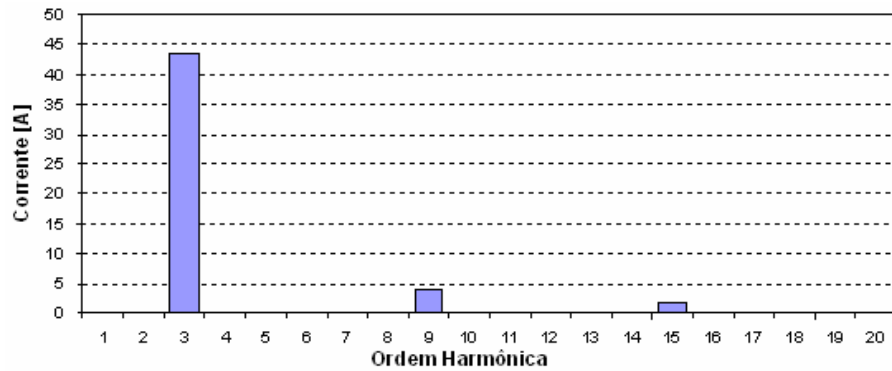


Figura 3.3 – Espectro harmônico da corrente no neutro do sistema da figura 3.1.

Para evidenciar o sobre-carregamento do condutor neutro do sistema da figura (3.1), o gráfico da corrente instantânea e da corrente eficaz (RMS) são mostrados na figura (3.4).

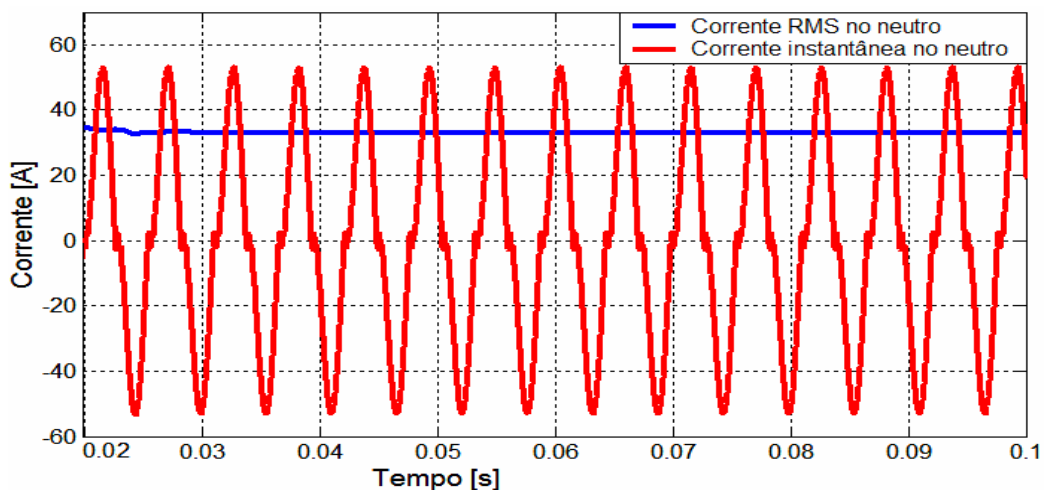


Figura 3.4 – Corrente instantânea no condutor neutro versus corrente eficaz (RMS)

Tendo sido o sistema teste modelado conforme acima descrito, o próximo passo foi modelar e implementar, neste sistema teste, as filosofias de filtragem de correntes de seqüência zero que circulam pelo condutor neutro abordados nesta dissertação.

3.2.1 – MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DA ESTRUTURA DE FILTRO TIPO 1

A estrutura a que se refere o tipo 1 é composta de três unidades monofásicas de transformadores interconectadas de forma a realizar uma ligação trifásica resultante em zig-zag. Este tipo de conexão tem sido utilizado para atenuar correntes de seqüência zero em condutores neutros de sistemas trifásicos a quatro fios, isto devido à sua baixa impedância de seqüência zero conjuntamente com alta impedância de seqüência positiva e negativa, o que é uma característica intrínseca deste tipo de configuração [23, 26, 27, 28, 52, 29, 36]. As características acima descritas não são exclusividades dos transformadores em zig-zag, sendo que os transformadores com conexões em estrela/delta (Y/Δ) e T também apresentam as características similares às do transformador em zig-zag, [26, 30, 31]. Para os referidos transformadores, a referência [26] apresenta uma tabela comparativa que relaciona a potência entre os transformadores utilizados como provedores de caminho de baixa impedância para as correntes de seqüência zero, a qual é reproduzida na tabela (3.1).

Tabela 3.1 – Relação de potência entre transformadores com baixa impedância de seqüência zero

Conexão	Zig-Zag	Y/Δ	T
(kVA)	$0,666 \times V_L I_{NC}$	$1,155 \times V_L I_{NC}$	$0,718 \times V_L I_{NC}$

Na tabela (3.1), V_L e I_{NC} são, respectivamente, a tensão de linha e a corrente de fase no transformador usado como filtro. Esta característica possibilita que o transformador em zig-zag seja o mais utilizado se comparado aos demais tipos de transformadores.

3.2.1.1 – PRINCÍPIO OPERATIVO DO TRANSFORMADOR ZIG-ZAG

Objetivando elucidar a propriedade considerada anteriormente, ou seja, provedor de caminho de baixa impedância para correntes de seqüência zero, a estrutura e configuração do transformador zig-zag é apresentada na figura (3.5).

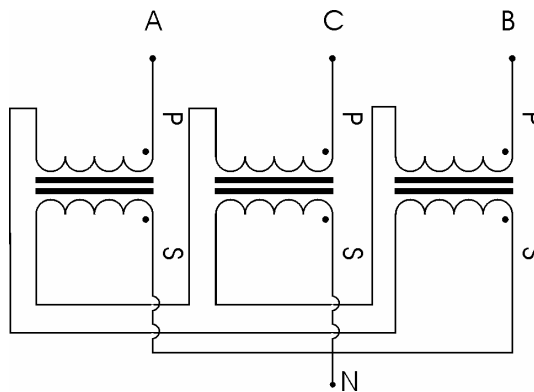


Figura 3.5 – Conexão de três unidades monofásicas de transformadores, de modo a formar uma unidade trifásica em ligação zig-zag.

Como pode ser visto na figura (3.5) acima, cada enrolamento percorre dois núcleos distintos, constituídos pelo mesmo número de espiras e ligados em zig-zag. Desta forma, cada coluna magnética apresentará uma força eletromotriz (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 (três fases+neutro), deve conduzir a um caminho de baixa impedância para componentes de seqüência zero. O motivo disto está atrelado ao fato que esta impedância (a do filtro) irá concorrer com a impedância do sistema de fornecimento (muito maior), servindo como caminho alternativo às correntes enfocadas.

Em sistemas trifásicos a quatro fios, nas três fases as correntes de seqüência zero $i_{a0}(t)$, $i_{b0}(t)$ e $i_{c0}(t)$ têm a mesma amplitude e a mesma fase e elas podem ser representadas da seguinte forma:

$$i_{a0}(t) = i_{b0}(t) = i_{c0}(t) \quad (3.1)$$

Onde:

$i_{a0}(t)$: corrente de seqüência zero na fase A

$i_{b0}(t)$: corrente de seqüência zero na fase B

$i_{c0}(t)$: corrente de seqüência zero na fase C

A corrente resultante que circula pelo condutor neutro é, portanto a soma das correntes de seqüência zero que circulam pelas fases, assim como mostra a equação (3.2);

$$i_n = 3i_{a0}(t) \quad (3.2)$$

Os transformadores utilizados na simulação têm relação de tensão de 1:1 já que os mesmos não têm a função de transformação de tensão, significando que a corrente que circula nos enrolamentos primários são iguais às correntes que circulam nos enrolamentos secundários. Objetivando mostrar a configuração desta primeira estrutura de filtragem e o comportamento da componente da corrente de seqüência zero, a figura (3.6) ilustra a configuração da aplicação do transformador zig-zag no sistema teste da figura (3.1).

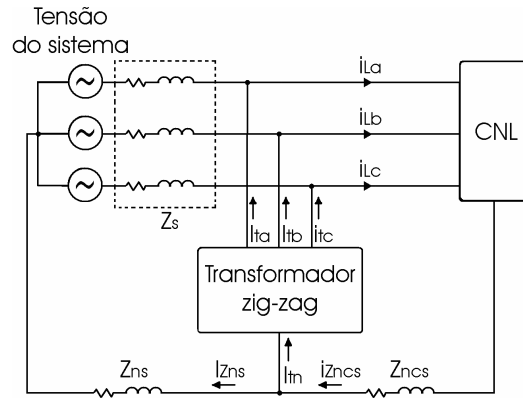


Figura 3.6 – Configuração da aplicação do transformador zig-zag no sistema teste da figura 3.1.

Onde;

CNL: Carga Não Linear;

Zs: impedância do sistema alimentador;

Zns: impedância do condutor neutro entre o neutro do transformador e o neutro do alimentador;

Zncs: impedância do condutor neutro entre o neutro da carga e o neutro do transformador;

i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc} : Correntes de carga nas fases A, B e C, respectivamente;

I_{Zns}, I_{Zncs} : Corrente de seqüência zero no neutro do sistema e na carga, respectivamente;

$I_{ta}, I_{tb}, I_{tc}, I_{tn}$: Correntes nas fases A, B e C do transformador e no neutro, respectivamente;

As correntes que circulam pelo transformador são todas de seqüência zero, o que leva ao diagrama da figura (3.7), que mostra o circuito equivalente de seqüência zero do circuito da figura (3.6).

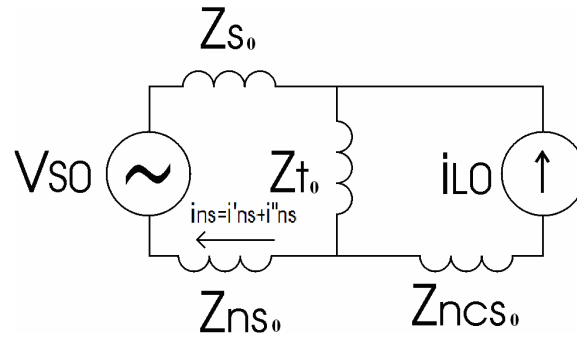


Figura 3.7 – Circuito equivalente de seqüência zero para o sistema da figura 3.6.

Onde;

V_{SO} : Tensão de seqüência zero gerada pela fonte;

I_{SO} : Corrente de seqüência zero gerada pela carga;

Z_{t0} : Impedância de seqüência zero do transformador em zig-zag;

Z_{S0} : Impedância de seqüência zero do sistema alimentador;

Z_{ns0} : Impedância de seqüência zero entre o neutro do transformador e o neutro do alimentador;

Z_{ncs0} : Impedância de seqüência zero do condutor neutro entre o neutro da carga e o neutro do transformador.

O circuito equivalente de seqüência zero da figura (3.7) é composto pelas impedâncias de seqüência zero e por duas fontes, uma fonte de tensão simbolizando eventuais tensões de seqüência zero provenientes do sistema e uma fonte de corrente, simbolizado como um retificador monofásico, conforme sugere a referência [21], que tem a função de simbolizar as correntes de seqüência zero que são injetadas pela carga não linear no sistema. Assim, é possível distinguir a contribuição da fonte de tensão da figura (3.7), dada na equação (3.3):

$$v_{s0}(t) = \frac{1}{3}(v_{an}(t) + v_{bn}(t) + v_{cn}(t)) \quad (3.3)$$

Da mesma forma, a fonte de corrente da figura (3.7) pode ser representada, de forma a se obter uma relação entre a corrente da fonte e as correntes de linha, expressa pela equação (3.4) a seguir:

$$i_{L0}(t) = \frac{1}{3}(i_{La}(t) + i_{Lb}(t) + i_{Lc}(t)) \quad (3.4)$$

O efeito das duas fontes atuando simultaneamente pode ser obtido baseando-se no princípio da superposição [27]. Considerando, a priori, o efeito da fonte de corrente, temos a seguinte contribuição, dada pela equação (3.5), obtida pela aplicação do divisor de corrente ao circuito da figura (3.7), no domínio do tempo;

$$i'_{ns} = \frac{Z_{t0}}{(Z_{s0} + Z_{ns0}) + Z_{t0}} i_{L0}(t) \quad (3.5)$$

Onde:

i'_{ns} : Contribuição da fonte de corrente à corrente no neutro do sistema;

Z_{t0} : Impedância de seqüência zero do transformador em zig-zag;

Z_{s0} : Impedância de seqüência zero do sistema;

Z_{ns0} : Impedância de seqüência zero do neutro do sistema;

$i_{L0}(t)$: Corrente de seqüência zero proveniente da carga.

Observa-se que, da equação (3.5), a corrente que circula no neutro em direção ao sistema diminuirá com a inserção do transformador. Por outro lado, a contribuição da fonte de tensão apresentada na figura (3.7) pode ser obtida de;

$$i''_{ns} = \frac{1}{Z_{s0} + Z_{ns0} + Z_{t0}} v_{s0}(t) \quad (3.6)$$

Onde:

i''_{ns} : Contribuição da fonte de tensão à corrente no neutro do sistema.

Pela equação (3.6) observa-se que o transformador zig-zag provê um caminho de circulação de corrente de seqüência zero, circulando entre o sistema e o mesmo, o que consiste em uma grande desvantagem deste método. Pois, se o sistema contiver tensões desequilibradas, o transformador poderá, além de suprir um caminho de baixa impedância para as correntes geradas pela carga, fornecer este caminho também para as correntes devido às tensões de seqüência zero geradas pelo desequilíbrio. Para contornar este problema, as referências [23, 25, 26, 27] sugerem algumas propostas.

A soma das equações (3.5) e (3.6) resulta na contribuição total das duas fontes, que é a corrente que circula pelo condutor neutro do sistema, e que é dada pela equação (3.7).

$$i_{ns} = \frac{Z_{t0}}{(Z_{s0} + Z_{ns0}) + Z_{t0}} i_{L0}(t) + \frac{1}{Z_{s0} + Z_{ns0} + Z_{t0}} v_{s0}(t) \quad (3.7)$$

A equação (3.7) indica que a instalação do transformador deverá ser feita o mais próximo possível da carga, devido ao aumento da relação entre a impedância do sistema $(Z_{s0} + Z_{ns0})$ em relação a impedância do filtro eletromagnético (Z_{t0}) .

3.2.1.2 – DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE TRANSFORMADORES

O banco de transformadores foi modelado para um nível de isolamento com tensão nominal de 13,8 kV. A corrente que irá fluir por ele foi obtida pela simulação do sistema teste, resultando em uma corrente de pico no neutro de 43 [A]. Para esta corrente é que o banco de transformadores deverá prover um caminho de baixa impedância, de forma a reduzir o carregamento do condutor neutro, e consequentemente aliviar o carregamento do transformador da subestação.

Em consonância com a equação (3.7), para que a eficiência do transformador zig-zag seja a maior possível, este deve ser dimensionado de maneira que a sua impedância seja de valor bem inferior a impedância do sistema à montante. À luz desta consideração, para o procedimento de cálculo dos parâmetros elétricos dos transformadores, a seguinte relação foi adotada arbitrariamente:

$$Z_t \leq (Z_{s0} + Z_{ns0}) \times 0,1 \quad (3.8)$$

Com a consideração da equação (3.8) e os dados do sistema teste o banco de transformadores foi modelado e acoplado ao sistema teste. Para facilitar os cálculos e dinamizar a operação, uma rotina de cálculo foi desenvolvida em MATLAB e maiores detalhes desta pode-se recorrer ao ANEXO A desta dissertação.

Adicionalmente, na figura (3.8a) e (3.8b) são mostradas, respectivamente, as tensões de fase e as correntes de linha do sistema antes da inserção do referido banco de transformadores. A figura (3.9) complementarmente mostra a corrente eficaz que circula pelo condutor neutro da instalação.

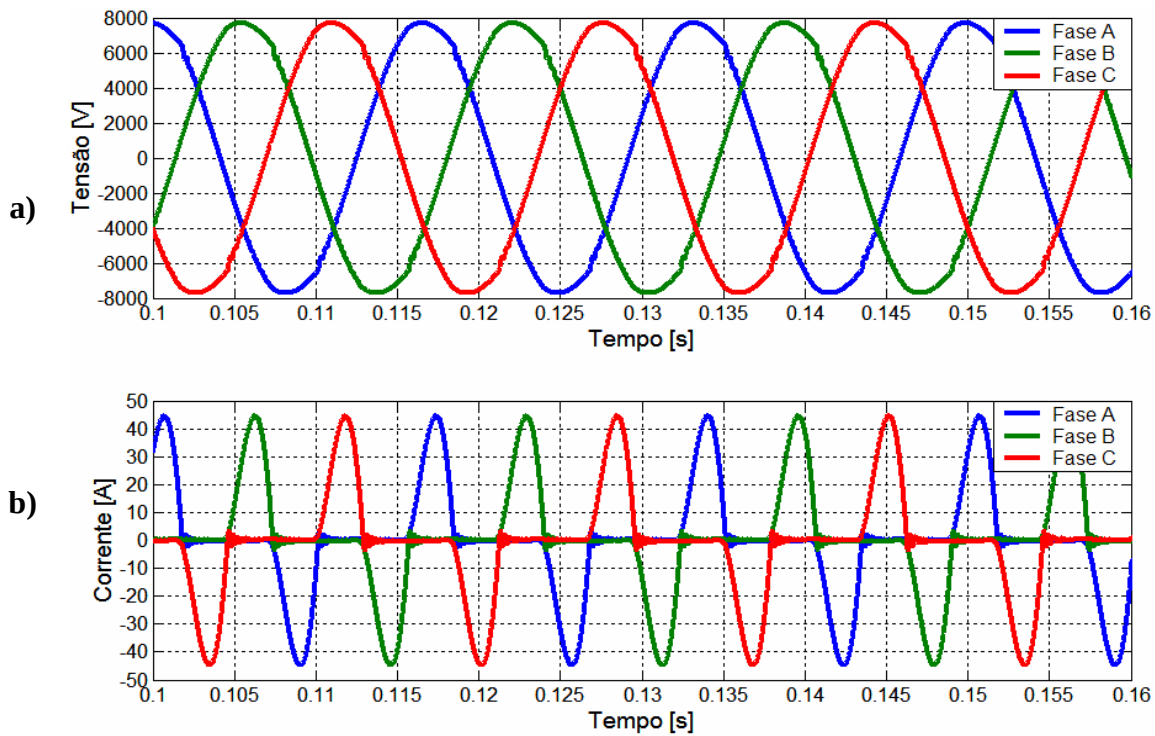


Figura 3.8 – a) Tensões de fase do sistema teste antes da conexão do banco de transformadores. b) Correntes de linha do sistema teste antes da conexão do banco de transformadores.

Como pode ser observado na figura (3.9), em comparação com a figura (3.8), a corrente que circula pelo condutor neutro é bastante elevada. Tal comparação é mais evidente quando se observa os picos das correntes de linha, em função das características das cargas monofásicas (retificadores monofásicos), que, intrinsecamente geram correntes harmônicas de ordem ímpar.

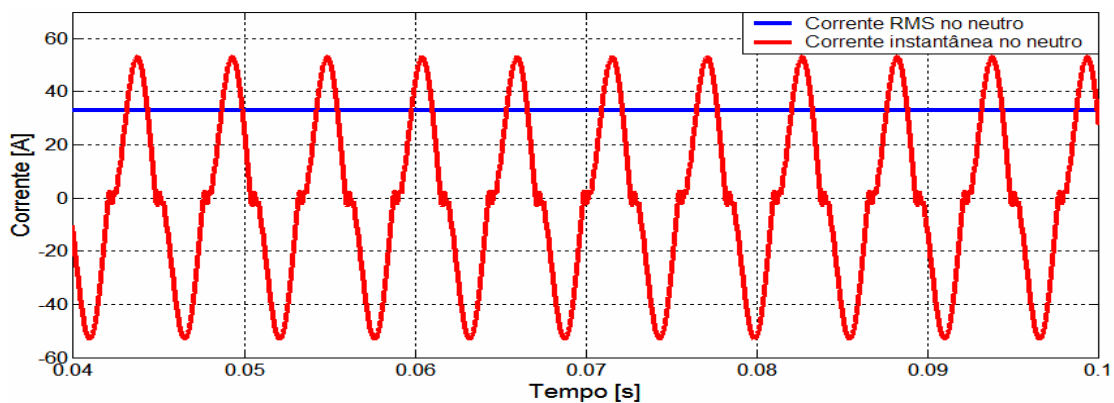


Figura 3.9 – Corrente no neutro do sistema teste antes da conexão do banco de transformadores.

A tabela (3.2) mostra os valores utilizados na modelagem dos transformadores em zigzag.

Tabela 3.2 – Parâmetros dos transformadores do filtro tipo 1.

Resistência de Magnetização (Ω)	317.400
Resistência do Enrolamento Primário (Ω)	0,08
Resistência do Enrolamento Secundário (Ω)	0,08
Indutância do Enrolamento Primário (mH)	0,31
Indutância do Enrolamento Secundário (mH)	0,31
Tensão do Enrolamento Primário (kV)	13,8
Tensão do Enrolamento Secundário (kV)	13,8

Com a conexão do banco de transformadores em paralelo com a carga, observa-se uma sensível redução das componentes de seqüência zero nas correntes de linha, o que significa uma forma de onda mais próxima de uma senóide, em comparação com as correntes da figura (3.8b). A figura (3.10) mostra o gráfico das tensões de fase e correntes de linha após a conexão do banco de transformadores. A corrente do neutro do sistema, com a conexão do banco de transformadores, reduziu significativamente em comparação ao gráfico da figura (3.9), como pode ser visto na figura (3.11), que mostra, por outro lado, a comparação entre a corrente *RMS* no neutro antes e após a conexão do transformador. Observa-se também nesta figura uma sensível redução do valor dessa corrente, o que evidencia a eficiência do dispositivo utilizado.

Com o objetivo de quantificar a corrente de neutro através de suas componentes harmônicas, a figura (3.12) mostra uma comparação entre a decomposição harmônica da corrente de neutro antes e após a conexão do banco de transformadores.

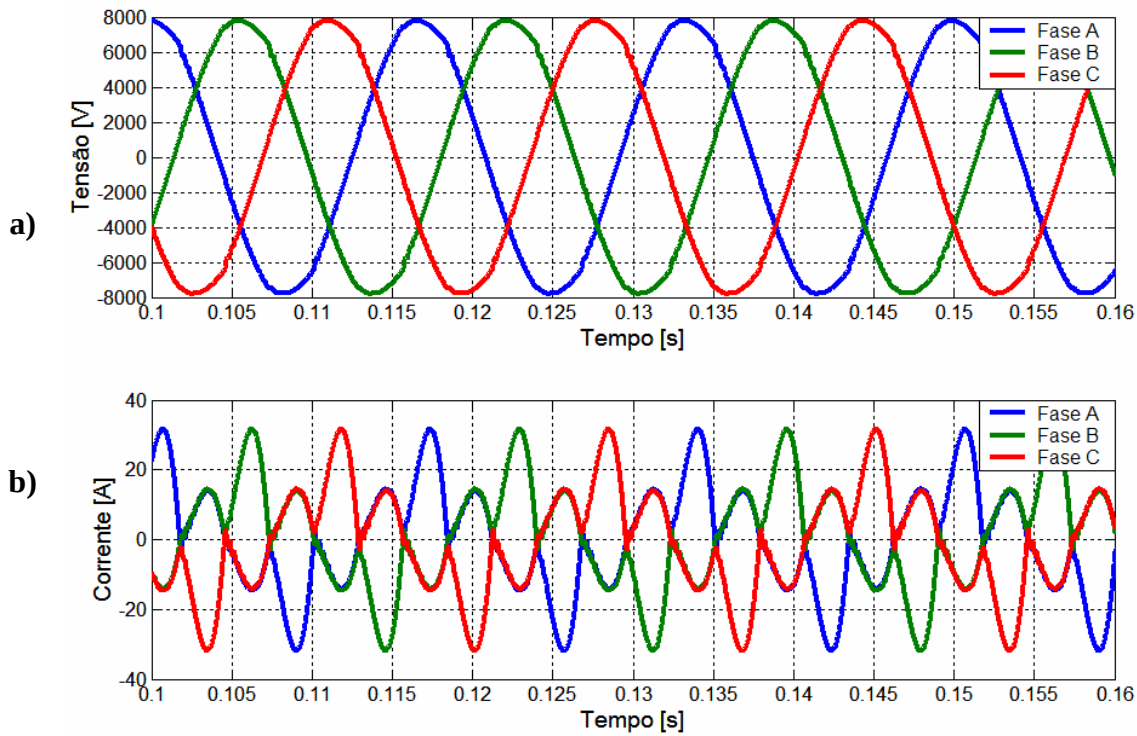


Figura 3.10 –a) Tensões de fase do sistema teste após a conexão do banco de transformadores. b) Correntes de linha do sistema teste após a conexão do banco de transformadores.

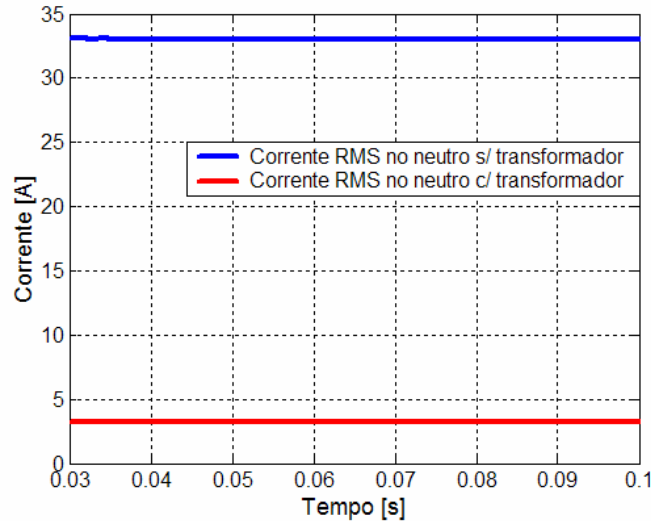


Figura 3.11 – Corrente eficaz no neutro antes e depois da conexão do transformador zig-zag em derivação com a carga.

A figura (3.13) analogamente à da corrente de neutro anterior apresenta agora as correntes de linha. Devido às similaridades entre as fases do sistema e da carga, será apresentada apenas a corrente da fase A, conforme ilustra a referida figura.

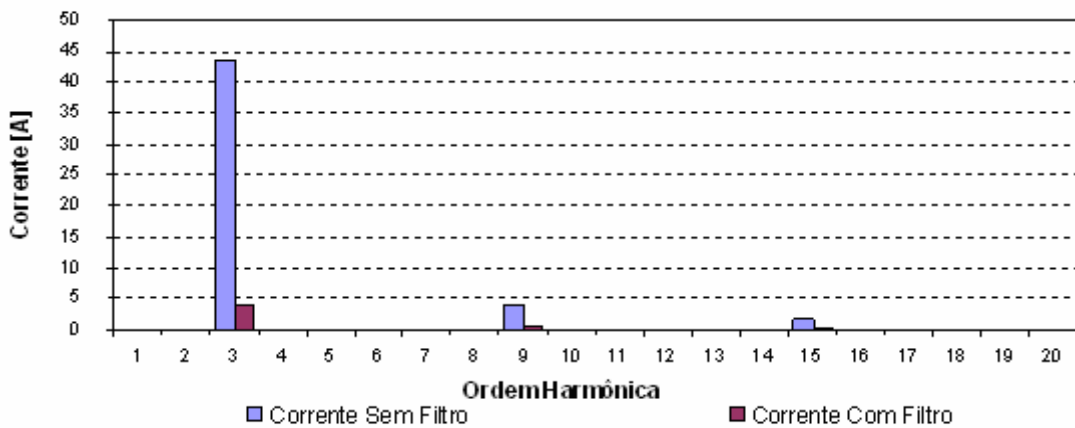


Figura 3.12 – Espectro harmônico da corrente no condutor neutro do sistema antes e após a conexão do filtro.

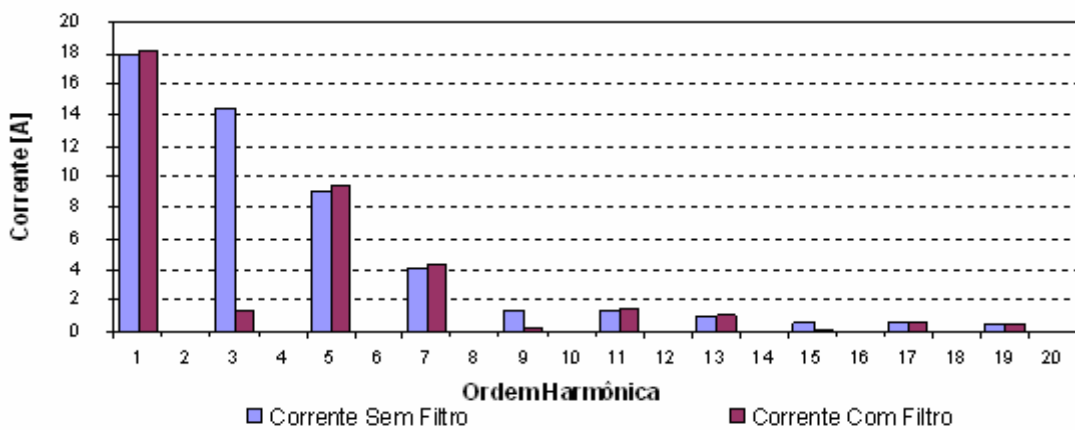


Figura 3.13 – Espectro harmônico da corrente da fase A do sistema antes e após a conexão do filtro.

Da figura (3.13) pode-se observar que houve uma redução significativa das correntes de sequência zero nas fases do sistema. Entretanto, houve um pequeno aumento nas demais correntes, acréscimo este que pode ser atribuído ao fato de o transformador estar consumindo uma pequena quantidade de energia, relativa às suas perdas, com o aumento da fundamental, sendo que este também representa uma impedância para as demais harmônicas, aumentando, assim algumas componentes harmônicas.

Assim, a tabela (3.3) resume as informações das harmônicas mais significativas contidas nas figuras (3.12) e (3.13) e o efeito comparativo obtido das correntes que fluem através do transformador.

Tabela 3.3 – Resumo e comparação entre as correntes de neutro do sistema, correntes de linha e corrente pelo neutro do transformador.

Corrente RMS	Ordem harmônica						
	Fundamental	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	11 ^a	13 ^a
Fase sem transformador	17,7	15,26	11,3	6,79	2,96	0,65	0,83
Fase com transformador	17,9	1,43	11,7	7,37	0,44	0,99	0,77
Neutro sem transformador	0,0027	45,79	0,0027	0,0015	8,89	0,0022	0,0012
Neutro com transformador	0,0001	4,27	0,0003	0,0002	1,349	0,0003	0,0001
Fluindo pelo transformador	0,009	43,221	0,009	0,0059	9,271	0,007	0,0035

3.2.1.3 – COMENTÁRIOS SOBRE O MODELO

Os resultados obtidos nesta etapa de investigações estão em consonância com os resultados apresentados nas referências [23, 26, 27, 29, 52]. Os trabalhos de simulação compreenderam a modelagem computacional do banco de transformadores monofásicos e a elaboração de uma rotina para estimar os parâmetros elétricos do transformador em função da potência e tensão de operação dos mesmos.

Foi considerada a variação dos parâmetros elétricos do transformador em função de sua potência, de forma a determinar a melhor condição operativa do banco de transformadores, visando desta forma um ponto adequado de operação. É óbvio que este ponto adequado, em se tratando de um sistema real, deve ser obtido pela consideração de, inclusive, outros parâmetros, que não foram aqui contemplados.

Dar-se-á prosseguimento às demais modelagens de filtros utilizados nesta dissertação, para todos os tipos adotando procedimentos similares ao desta seção.

3.2.2 – MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DA ESTRUTURA DE FILTRO TIPO 2

A estrutura do filtro tipo 2 de que trata esta sub-seção é composta por componentes LC sintonizados na frequência fundamental e em série com a linha. Esse tipo de filtro também é conhecido como compensador bloqueador de harmônicos (*harmonic blocking compensator*) [12]. Portanto, a principal função da estrutura tipo 2 é proporcionar uma impedância de linha elevada para as correntes harmônicas superior à fundamental. Complementarmente, em conjunto com o compensador bloqueador de harmônicos é utilizado um capacitor em derivação com a carga, com vistas a prover a energia reativa demandada pela carga e, paralelamente fornecer um caminho de baixa impedância para as correntes de ordem superior injetadas no sistema pela carga.

3.2.2.1 – PRINCÍPIO OPERATIVO DO COMPENSADOR BLOQUEADOR DE HARMÔNICOS

Com o objetivo de melhorar o desempenho de filtros harmônicos ressonantes série em paralelo (*shunt*) com a carga, um indutor em série (ou um bloqueador eletromagnético) pode ser inserido entre a fonte e o filtro harmônico para aumentar a impedância vista pela carga, e assim forçar a passagem da corrente pelo filtro, ao invés de fluir pelo sistema. Porém, esta ação pode produzir uma queda de tensão considerável no indutor, o que limita o valor da indutância a ser inserida. Devido a esta limitação, um indutor de valor reduzido pode não melhorar a eficiência do filtro conforme o esperado [12].

A conexão de um filtro sintonizado na frequência fundamental, inserido em série com a linha, ao invés de um indutor (ou de um bloqueador eletromagnético), torna possível o aumento da reatância série para correntes harmônicas múltiplas da fundamental sem causar uma queda de tensão perceptível na linha para a frequência fundamental. Havendo uma reatância série elevada para as correntes harmônicas, é possível que a presença de um filtro passivo em derivação seja dispensável, sendo este filtro substituído por um capacitor, com a finalidade de prover a potência reativa necessária para a correção de fator de potência e de prover um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas injetadas pela carga a jusante do filtro série. O circuito equivalente do filtro é mostrado na figura (3.14).

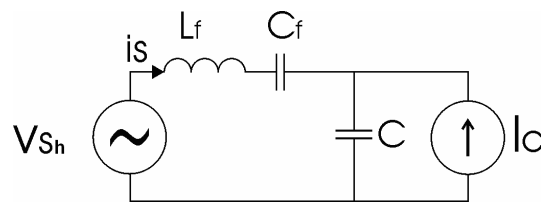


Figura 3.14 – Circuito equivalente do filtro LC série: Compensador bloqueador de harmônicos.

Onde:

V_{sh} : Possíveis tensões harmônicas geradas pelo sistema;

i_s : Corrente fornecida pelo sistema;

L_f : Indutância do filtro;

C_f : Capacitância do filtro;

C : Capacitância *shunt*;

I_c : Correntes harmônicas geradas pela carga.

Como a indutância série do sistema é usualmente muito menor do que a indutância equivalente do filtro série aqui considerado, aquela pode ser desprezada para o cálculo da frequência de ressonância, ω_f , considerado na referência [12], e mostrado pela equação (3.9).

$$\omega_f = \omega_1 \sqrt{1 + \frac{C_f}{C}} \quad (3.9)$$

Onde:

ω_f : frequência de ressonância do filtro;

ω_1 : frequência fundamental do sistema;

A frequência de ressonância do filtro é calculada de tal forma que seja a mais próxima possível da frequência fundamental, como na referência [12]. Como critério de cálculo, foi admitida uma variação de frequência da ordem de 1,6 %, de forma a se considerar pequenas variações na frequência do sistema, devido às variações bruscas das características do sistema (entrada e/ou saída de cargas e linhas, entre outras).

3.2.2.2 – DIMENSIONAMENTO DO FILTRO EM SÉRIE (tipo 2)

A referência [12] propõe uma metodologia para o cálculo dos parâmetros do filtro, conforme considerado a seguir.

O primeiro passo para a determinação dos parâmetros L_f e C_f dos elementos do filtro foi a identificação dos valores complexos de tensão e corrente do sistema.

O segundo passo é o dimensionamento do capacitor (C) para a correção do reativo necessário, cujo valor é dado na equação (3.10), conforme referência [12].

$$C = \frac{B_1}{\omega_1} = \frac{-1}{\omega_1} \left(\text{Im} \left(\frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1} \right) \right) \quad (3.10)$$

Onde:

C : capacitância para correção do fator de potência;

B_1 : susceptância necessária para a correção do fator de potência;

ω_1 : frequência angular na frequência fundamental;

$\dot{I}_1$: fasor da componente fundamental da corrente;

$\dot{U}_1$: fasor da componente fundamental da tensão.

O terceiro passo possibilita, de posse do valor da capacitância necessária para a correção do fator de potência, por meio da equação (3.10) a determinação do valor da capacitância (C_f) do filtro. Por fim, a indutância do filtro foi determinada pela equação (3.11):

$$L_f = \frac{1}{\omega_1^2 C_f} \quad (3.11)$$

Como resultados da simulação, a figura (3.15) mostra as formas de onda da tensão de fase e da corrente de linha do sistema antes da conexão da estrutura proposta neste item.

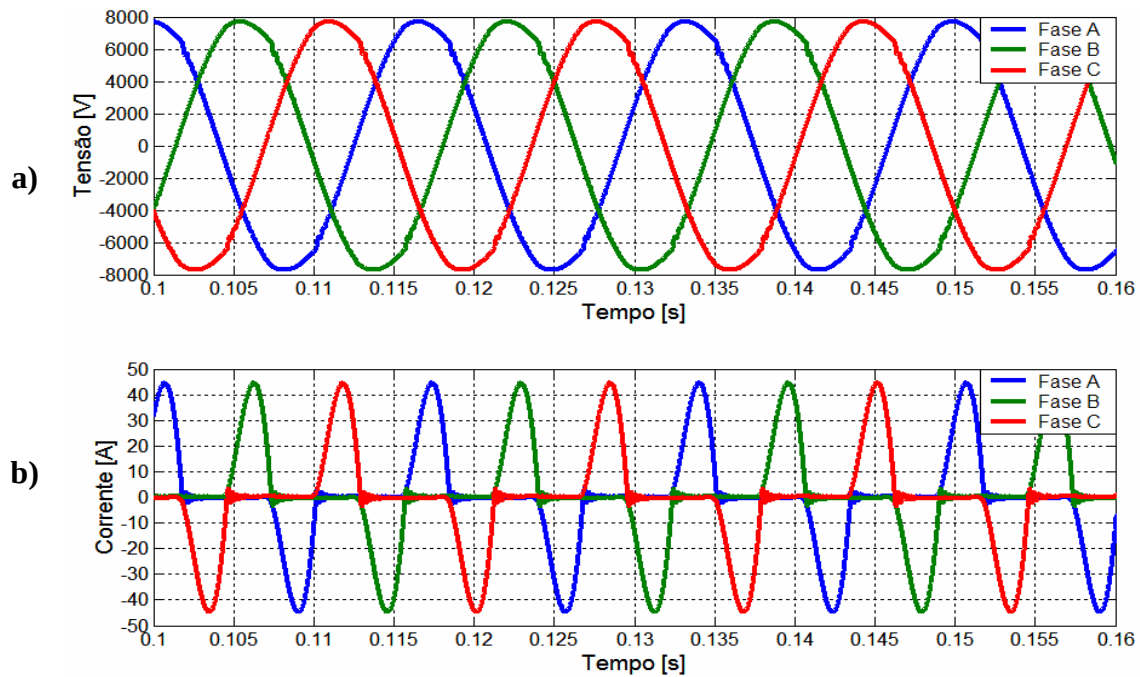


Figura 3.15 – a) Tensões de fase do sistema teste antes da conexão do filtro. b) Correntes de linha do sistema teste antes da conexão do filtro.

A tabela (3.4) resume os dados dos elementos L e C, por fase, utilizados na simulação.

Tabela 3.4 – Elementos RLC do filtro utilizados na modelagem dos filtros em série.

Indutor (H)	8,59
Capacitor (μ F)	0,819
Resistência (Ω)	0,2
Fator de qualidade (Q)	60

Após a conexão do filtro no sistema verifica-se uma sensível diminuição das correntes harmônicas pelos condutores das fases e do neutro. Como era de se esperar, o bloqueador apresentou uma baixa impedância à corrente fundamental e uma alta impedância para as demais correntes harmônicas. Estas constatações podem ser observadas através da figura (3.16) que mostra os resultados para as correntes de linha e as correntes no neutro após a conexão do filtro no sistema.

Com o objetivo de quantificar a corrente de neutro através de suas componentes harmônicas, a figura (3.17) mostra uma comparação entre a decomposição harmônica da

corrente de linha antes e após a conexão do filtro. Analogamente, a figura (3.19) realiza o mesmo procedimento para as correntes de neutro. Como anteriormente, devido a similaridade em outras fases, a figura (3.18) apresenta resultados somente para a corrente da fase A.

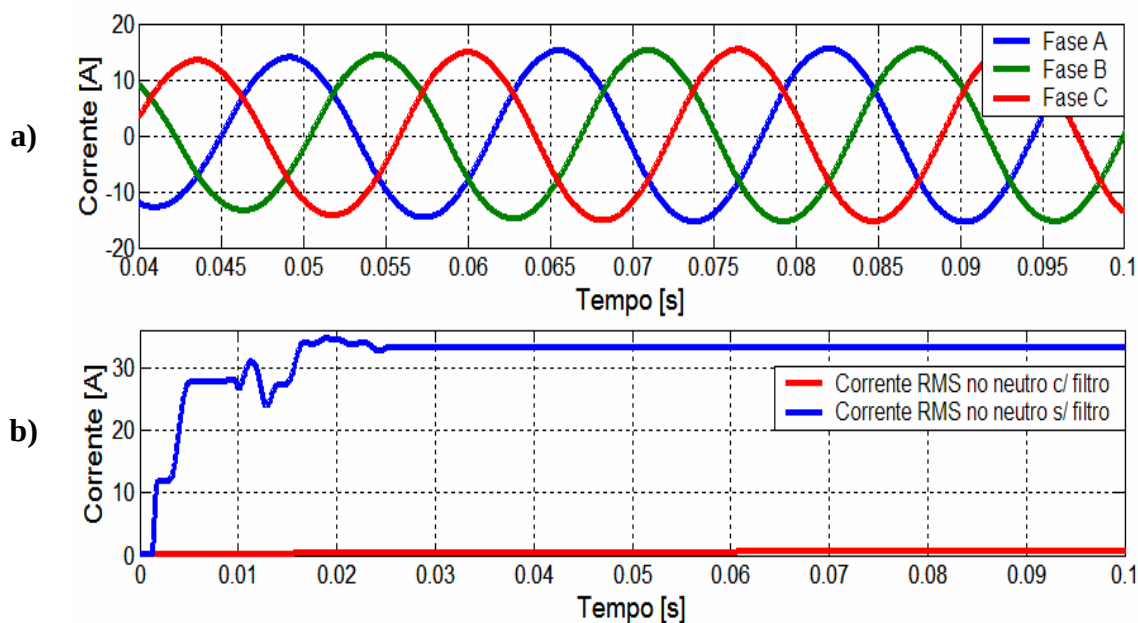


Figura 3.16 – a) Correntes de linha do sistema teste após a conexão do filtro. b) Correntes no neutro do sistema teste após a conexão do filtro.

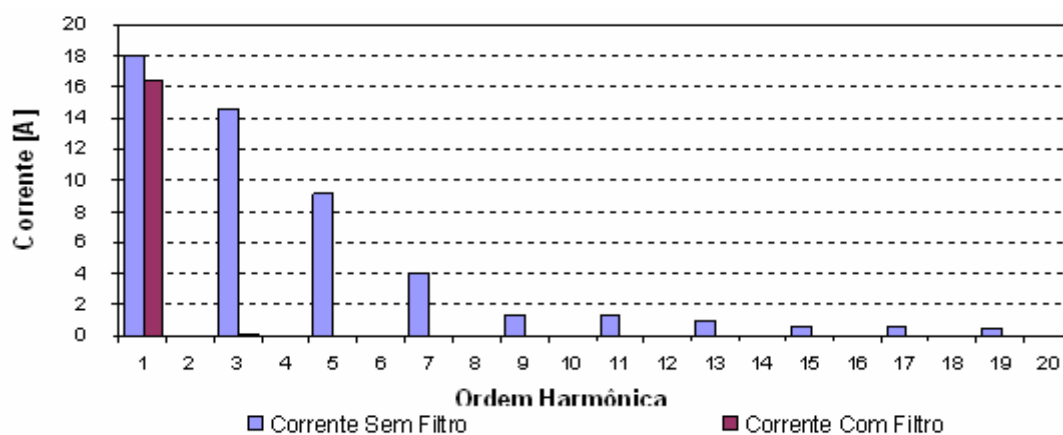


Figura 3.17 – Espectro harmônico da corrente da fase A do sistema antes e após a conexão do filtro.

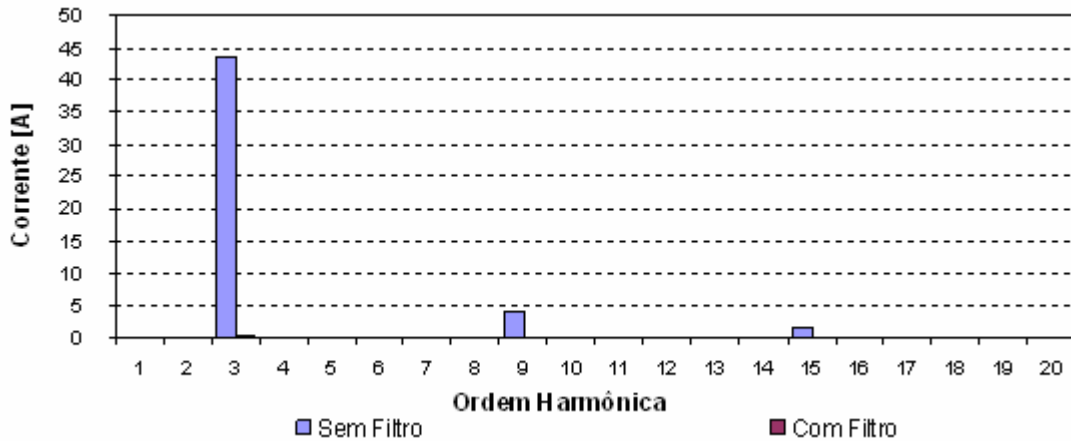


Figura 3.18 – Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após a conexão do filtro.

A comparação entre as figuras (3.17) e (3.18) mostra a eficiência do filtro. Neste sentido observa-se que a corrente na fase A é composta predominantemente pela corrente fundamental, o que evidencia o bloqueio das componentes de frequência acima da fundamental. Como as cargas são equilibradas, conclui-se que a corrente de neutro é composta por apenas correntes de sequência zero. Neste caso, como o filtro está bloqueando as correntes acima da fundamental, e como o circuito se fecha no neutro, neste haverá um pequeno resíduo de corrente, que tem amplitude da ordem de 0,5 amperes.

Pode-se mencionar que a grande desvantagem desta filosofia de filtragem harmônica está na queda de tensão harmônica que provoca uma distorção na tensão de alimentação da carga. Neste particular, a figura (3.19) mostra como as tensões de fase se tornam distorcidas após a conexão do filtro e a figura (3.20) mostra o respectivo espectro harmônico para as duas situações de operação do sistema.

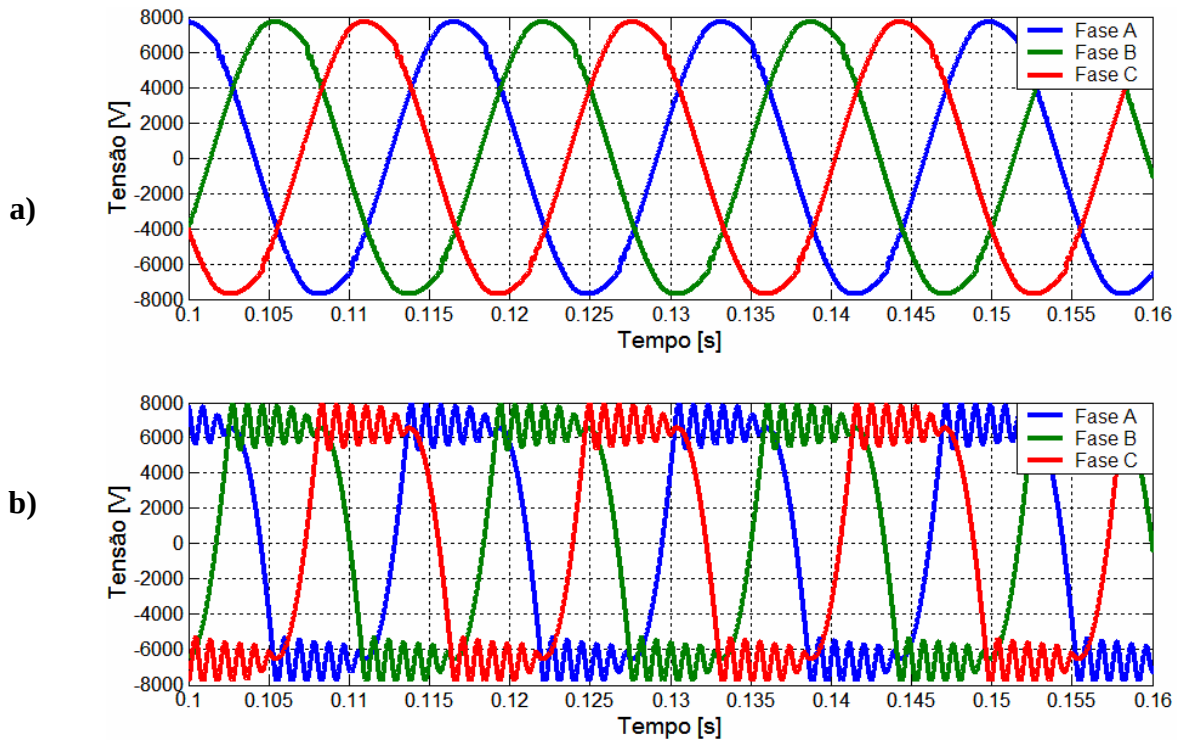


Figura 3.19 – a) Tensões de fase do sistema teste antes da conexão do filtro. b) Tensões de fase do sistema teste após a conexão do filtro.

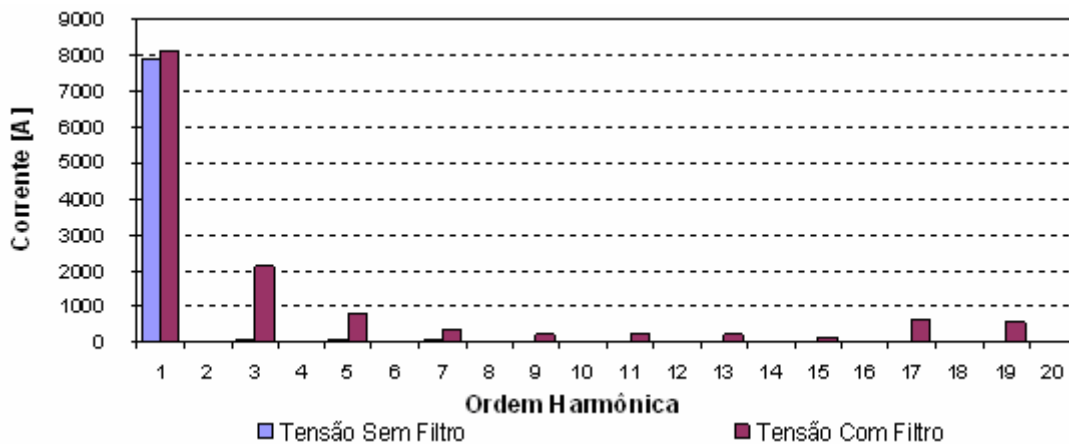


Figura 3.20 – Espectro harmônico da tensão de fase do sistema teste antes e após a conexão do filtro.

A tabela (3.5) resume as informações contidas nas figuras (3.17), (3.18), (3.19) e (3.20) com o objetivo de tornar mais clara a análise feita acima pelas referidas figuras.

Tabela 3.5 – Resumo do estudo da modelagem do filtro bloqueador harmônico.

Corrente		Ordem harmônica								
		Fundamental	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª
Fase Filtro	s/	17,94	0,0017	14,53	0,0007	9,127	0,002	4,0253	0,0024	1,36
Fase Filtro	c/	16,425	0,011	0,058	0,0045	0,0082	0,0029	0,0053	0,0021	0,003
Neutro Filtro	s/	0,003	0,0053	43,56	0,0053	0,0028	0,002	0,0018	0,0022	4,084
Neutro Filtro	c/	0,003	0,0006	0,156	0,0001	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,005

3.2.2.3 – COMENTÁRIOS SOBRE O MODELO

Os resultados obtidos com a modelagem e implementação computacional do filtro bloqueador de harmônico em estudo aqui nesta seção estão em total consonância com os resultados obtidos na referência [12]. Os trabalhos de simulação compreenderam a modelagem computacional do filtro e a elaboração de uma planilha para estimar os parâmetros elétricos do filtro em função da potência reativa necessária para a correção do fator de potência da instalação.

Dos resultados obtidos na simulação do modelo do filtro observa-se que a distorção harmônica na forma de onda da tensão ficou muito acentuada, caracterizada por um achatamento no pico da onda do sinal de tensão. Pode-se considerar que esta é a maior desvantagem deste método, tendo em vista que as fontes e equipamentos podem ter suas suportabilidades (*ride through*) a afundamentos de tensão, comprometidas, uma vez que a energia elétrica armazenada no elo CC do retificador será menor, em função do menor valor de pico. Com isso, o valor da tensão no elo CC que, antes da compensação era de 7,173 kV, após a conexão do filtro atingiu um novo valor de 6,205 kV, ou seja, uma redução de

aproximadamente 13,5 %, o que fica claro que isso irá reduzir a suportabilidade do equipamento considerado.

O sistema mostrou-se muito eficiente no que diz respeito à supressão de correntes harmônicas, mas pelo fato de apresentar uma impedância alta para as demais harmônicas geradas pela carga, a queda de tensão nesta impedância harmônica é um fator que deve ser levado em conta na pretensão de utilização deste método.

Dar-se-á prosseguimento às demais modelagens dos filtros seguintes utilizados nesta dissertação, todos seguindo o mesmo procedimento adotado nesta seção e na seção anterior.

3.2.3 – MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DA ESTRUTURA DE FILTRO TIPO 3

Neste tipo de estrutura, a filosofia adotada é idêntica à filosofia utilizada na estrutura do tipo 1, ou seja, o objetivo é o oferecimento de um caminho de baixa impedância para o fluxo da corrente de seqüência zero [12, 13, 14, 15, 16 17, 53]. O diferencial está no princípio que é utilizado para o provimento deste caminho. Na estrutura do tipo 1, foi utilizada uma estrutura eletromagnética, que provê este caminho para todas as correntes de seqüência zero que estejam presentes no ponto de conexão do dispositivo com o sistema. Enquanto que na estrutura denominada de tipo 3, foi utilizada uma rede com elementos passivos utilizando-se de indutâncias, capacitâncias e resistências, com o objetivo de obtermos um filtro sintonizado na freqüência de interesse.

3.2.3.1 – PRINCÍPIO OPERATIVO DO FILTRO HARMÔNICO SINTONIZADO EM DERIVAÇÃO

Como sabido, os filtros sintonizados são largamente utilizados para minimizar o efeito das distorções harmônicas de corrente e tensão. Estes são circuitos bastante robustos, empregando o princípio da ressonância série para realizar a filtragem dos sinais, deste modo, podem operar tanto selecionando um determinado sinal como também rejeitando o sinal desejado. Constituídos por elementos resistivos, capacitivos e indutivos, estes circuitos conforme os conceitos da teoria de circuitos detêm a propriedade de, quando na presença de frequências acima da frequência de ressonância apresentar características indutivas, e, quando na presença de frequências abaixo da frequência de ressonância se comportar como circuitos capacitivos, efetuando a função de compensação reativa.

Para efeito de avaliação preliminar, utilizando-se assim os conceitos básicos de circuitos acima mencionados, a figura (3.21) ilustra o diagrama de um circuito RLC em série, alimentado por uma fonte de tensão.

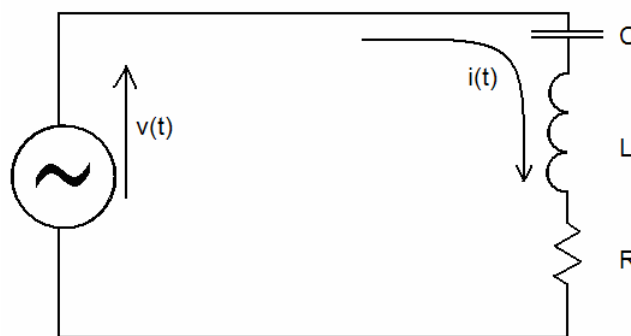


Figura 3.21 – Diagrama de um circuito RLC em série ressonante.

De acordo com as características e conceitos da ressonância série, na qual o circuito da figura (3.21) é fundamentado, a impedância complexa do circuito pode ser computada por meio da aplicação da equação (3.12).

$$\dot{Z}(\omega) = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (3.12)$$

Onde:

ω : é a freqüência angular da fonte de alimentação.

Como se sabe, com a variação da freqüência da fonte, haverá uma freqüência em que o sistema será ressonante, ou seja, a impedância tornar-se-á puramente resistiva. O módulo e o ângulo de fase da impedância série da expressão acima podem ser expressos de acordo com as equações (3.13) e (3.14) respectivamente.

$$|\dot{Z}| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (3.13)$$

$$\phi(\omega) = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}\right) \quad (3.14)$$

Onde:

$|\dot{Z}|$: módulo da impedância complexa;

$\phi(\omega)$: ângulo da impedância complexa.

Para a condição de ressonância, a parte imaginária de $\dot{Z}$ é anulada, o que resulta para o sistema ressonante, na frequência de ressonância uma impedância puramente resistiva.

Assim, a frequência de ressonância deste sistema pode ser obtida de:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.15)$$

Pode-se observar que a expressão anterior é função apenas dos elementos indutivo e capacitivo do circuito. Portanto, pode-se concluir que a frequência ω_0 é característica de circuitos RLC. Isso significa que, se houver qualquer fonte de alimentação com frequência variável e esta assumir o valor ω_0 , esta fonte fará com que o circuito em questão entre em ressonância série.

3.2.3.2 – DIMENSIONAMENTO DO FILTRO EM DERIVAÇÃO

Os procedimentos de cálculo para a determinação dos filtros harmônicos nesta seção do trabalho foram considerados a partir dos princípios e metodologia constantes na referência [1], com vistas a, além de filtrar as correntes harmônicas geradas pela carga, fornecer a potência reativa necessária para a correção do fator de potência.

Para tanto, a necessidade de conhecer a condição operativa do sistema antes da conexão do filtro é óbvia, e assim sendo, a figura (3.22) mostra os sinais de tensão e corrente antes da conexão do filtro. Observa-se que o sinal de corrente se apresenta bastante distorcido, tendo em vista a carga fortemente não linear (retificador monofásico com capacitor de

alisamento no barramento CC). As figuras (3.23) e (3.24) apresentam os espectros harmônicos das correntes da fase A e da corrente que flui pelo neutro do sistema antes da conexão do filtro.

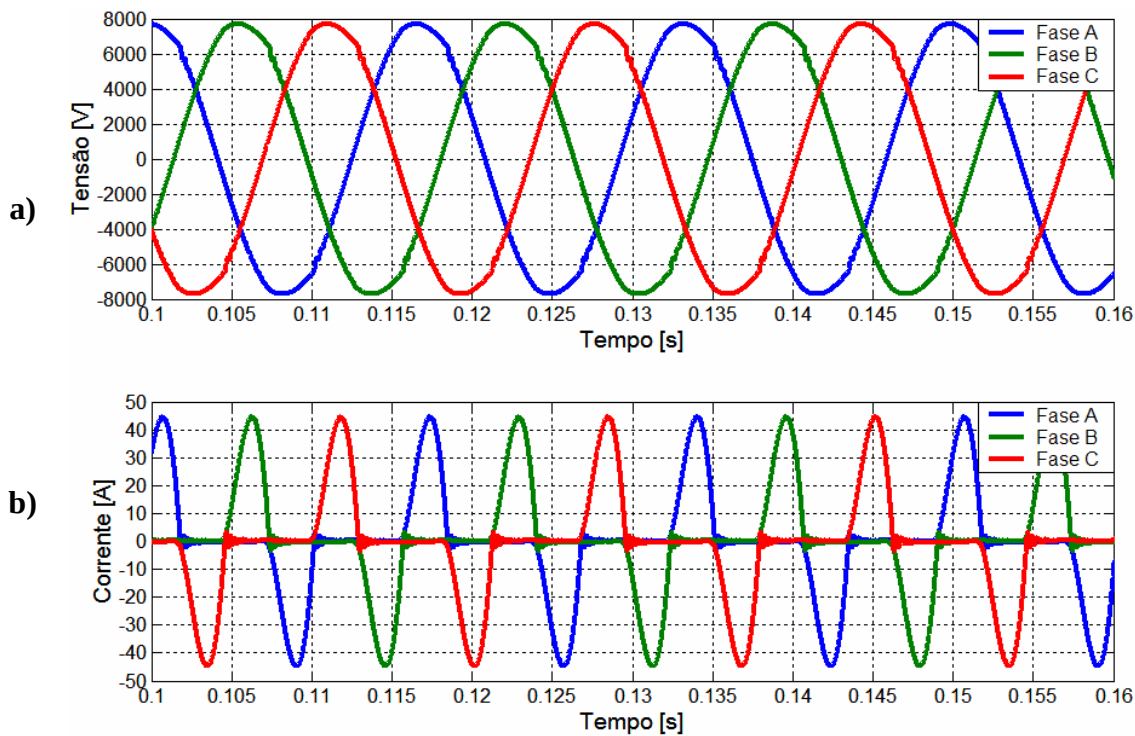


Figura 3.22 – a) Tensões de fase do sistema teste antes da conexão do filtro. b) Correntes de linha do sistema teste antes da conexão do filtro.

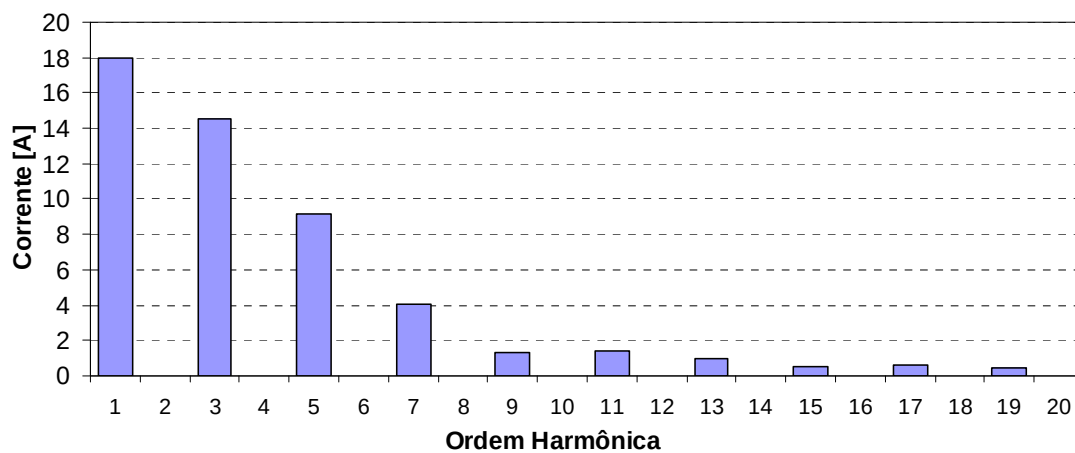


Figura 3.23 – Espectro harmônico da corrente da fase A antes da conexão do filtro.

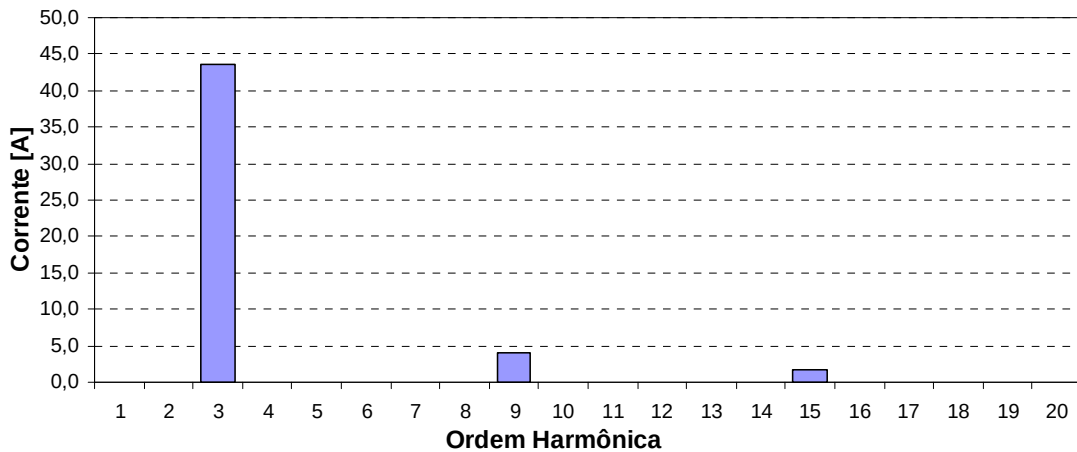


Figura 3.24 – Espectro harmônico da corrente circulante pelo neutro do sistema da figura 3.1.

Diante das medições realizadas no sistema antes da conexão dos filtros, é possível verificar que o fator de potência, considerando-se tão somente a fundamental é de 0,97, o que resulta em uma medida enganosa, pois, o fator de potência verdadeiro (*true power factor*) é de 0,69, muito abaixo do valor permitido pela legislação, qual seja, 0,92 média horária.

Nesta dissertação, inicialmente para este tipo de filtro foi considerado aquele para correntes de ordem três (estrela aterrada), tendo em vista ser a corrente de maior magnitude apresentada pela figura (3.3).

Assim, a tabela (3.6) resume os resultados dos cálculos para a determinação dos parâmetros do filtro tipo 3, aqui considerado. O ANEXO D mostra a formulação matemática utilizada para determinar os valores da tabela (3.6), com base na referência [1].

Tabela 3.6 – Resumo dos parâmetros do sistema e do filtro de 3ª ordem modelado.

Potência reativa atual requerida pelo sistema (VAr)	101504,9
Potência reativa para $fp = 0,97$ (VAr)	39562,2
Potência reativa a ser fornecida pelo filtro (VAr)	61942,7
Reatância do filtro (Ω)	1001,4
Impedância do capacitor na fundamental (Ω)	1126,58
Capacitor (μF)	2,354
Reator (H)	0,33204
Fator de qualidade (Q) X_L / R	60

As figuras (3.25a) e (3.25b) mostram, respectivamente, a variação do módulo e do ângulo da impedância do filtro, em função da frequência. Esta representação é importante, pois mostra o funcionamento do filtro, podendo ser observado que, quando a frequência do sistema coincide com a frequência de ressonância do filtro (neste caso, 180 Hz) o módulo da impedância mínima é praticamente resistivo, e o ângulo de fase é próximo de zero graus, o que vem de encontro com o estabelecido nas equações (3.13) e (3.14).

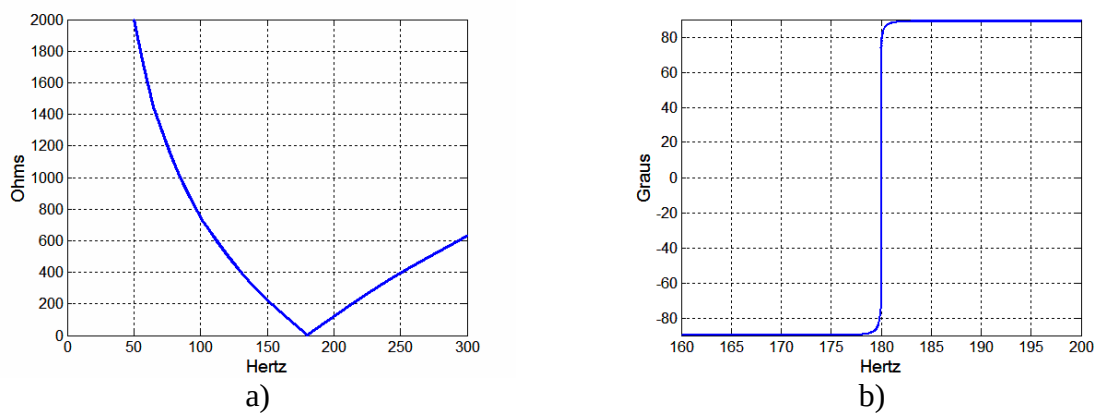


Figura 3.25 – a) Módulo da impedância do filtro em função da variação da frequência. b) Variação do ângulo da impedância do filtro com a frequência.

Uma vez calculados os parâmetros do filtro para 3ª ordem harmônica, conforme as equações (3.13), (3.14) e (3.15), o passo seguinte foi conectá-lo ao sistema teste da figura (3.1) para verificação do seu desempenho. Assim sendo, a figura (3.26) ilustra o diagrama do circuito resultante do filtro em questão.

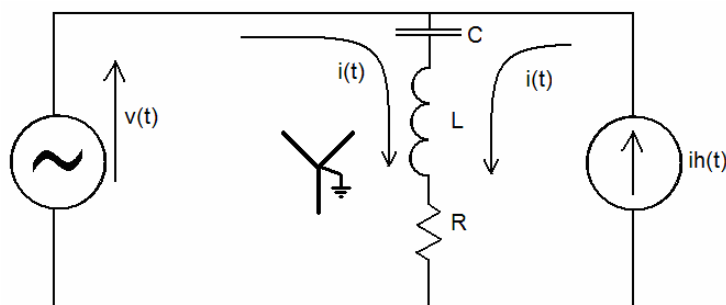


Figura 3.26 – Diagrama resultante por fase do sistema com o filtro de correntes de terceira ordem.

Como resultados da conexão do filtro no sistema, são apresentadas as figuras (3.27a) e (3.27b), as formas de onda das tensões e da corrente no barramento de conexão do filtro com o sistema. Objetivando verificar a eficiência do filtro, as figuras (3.28) e (3.29) apresentam, respectivamente, o espectro harmônico das correntes de fase e de neutro após a conexão do filtro. Nestas figuras observa-se de forma comparativa a eficácia do filtro, no que diz respeito à circulação de correntes de ordem três nas fases e no neutro.

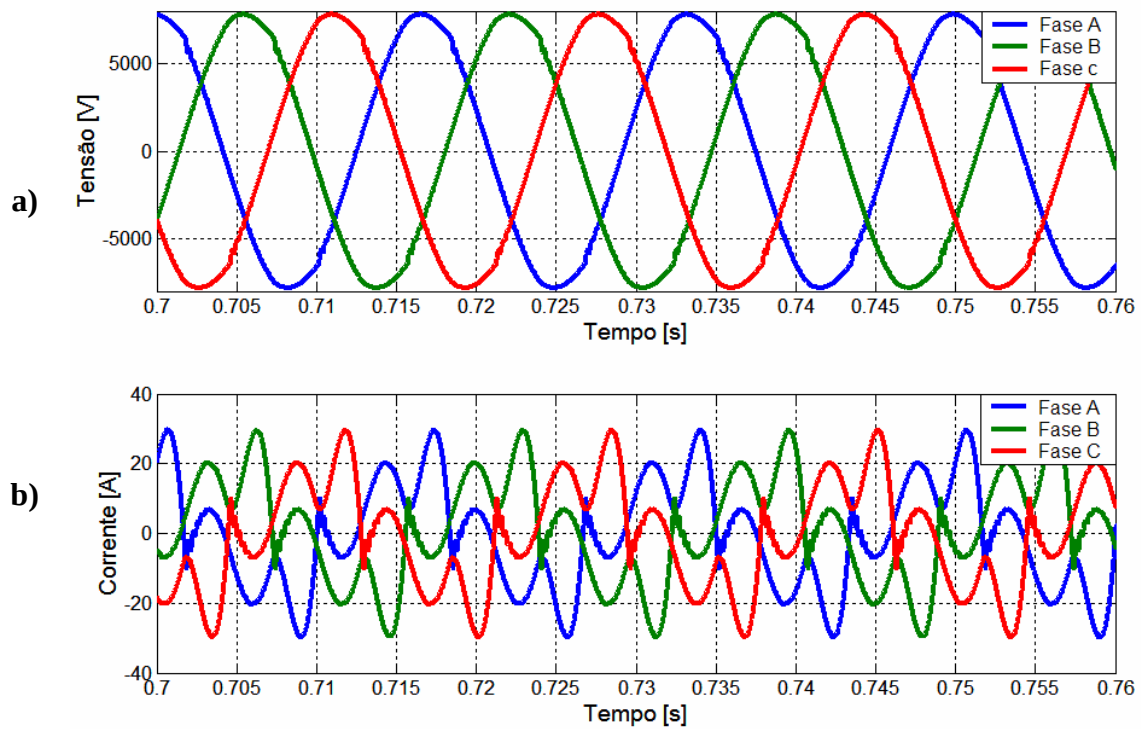


Figura 3.27 – a) Tensões de fase do sistema teste após a conexão do filtro. b) Correntes de linha do sistema teste após a conexão do filtro.

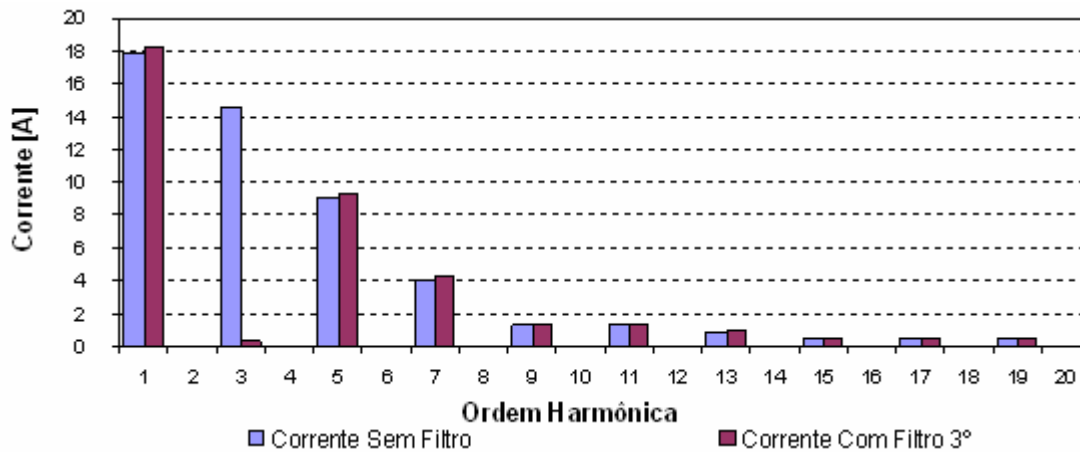


Figura 3.28 – Espectro harmônico da corrente da fase A após a conexão do filtro.

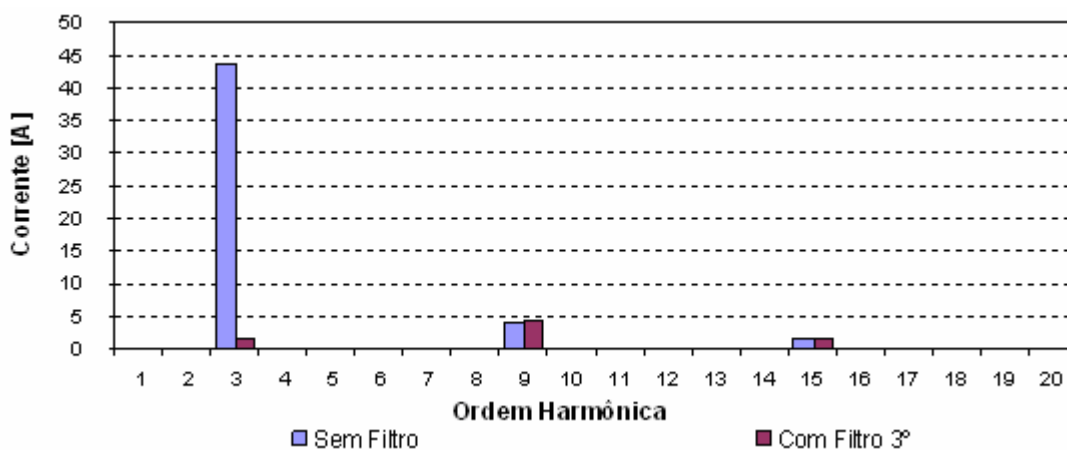


Figura 3.29 – Espectro harmônico da corrente no neutro após a conexão do filtro.

Das figuras (3.28) e (3.29) observa-se também a redução das correntes de ordem três, tanto das fases quanto no condutor neutro. Contudo, deve-se salientar que mesmo com a operação do filtro de terceira harmônica a distorção harmônica total de corrente de linha permanece alta, correspondendo a 58,4%. O fator de potência também não atingiu um patamar adequado, e se encontra no nível de 0,84, devido às outras ordens harmônicas, fato este inteiramente justificável ao se verificar o valor remanescente da distorção harmônica de corrente. Por outro lado, é possível observar uma sensível melhora do sistema com a conexão do filtro para correntes de terceira ordem, sendo que antes da conexão do filtro a distorção harmônica total da corrente de fase que era de 99,15%, passou para 58,4% após a conexão do

filtro. Adicionalmente, a figura (3.30) mostra o comportamento da corrente de neutro antes e após a conexão do filtro para ordem três em derivação. Com o objetivo de melhorar estes dois indicadores, foi modelado um filtro para correntes harmônicas de ordem 5 em delta. O procedimento para a determinação dos parâmetros dos elementos do filtro para este caso foram análogos aos adotados para o filtro de correntes harmônicas de terceira ordem.

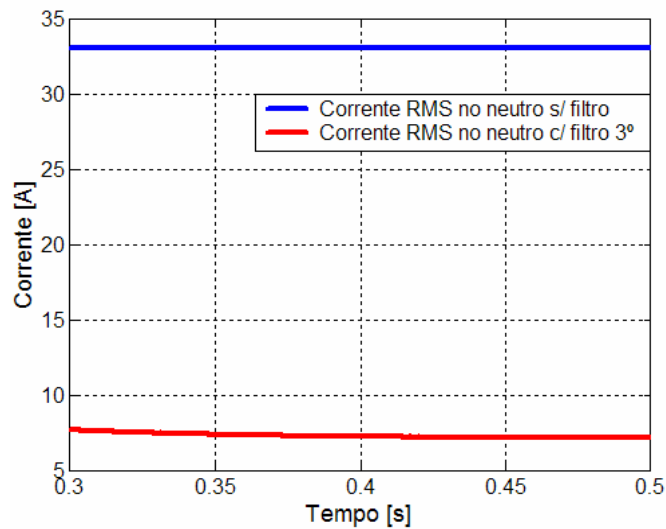


Figura 3.30 – Corrente RMS no neutro do transformador sem e com a conexão do filtro em derivação para a terceira harmônica.

Assim, a tabela (3.7) abaixo sumariza os dados utilizados para a modelagem do filtro para a 5ª ordem.

Tabela 3.7 – Resumo dos parâmetros do sistema e do filtro de 5ª ordem modelado.

Potência reativa atual requerida pelo sistema (VAr)	78218,47
Potência reativa para $f_p = 0,97$ (VAr)	40405,22
Potência reativa a ser fornecida pelo filtro (VAr)	37813,21
Reatância do filtro (Ω)	1643,88
Impedância do capacitor na fundamental (Ω)	1712,38
Capacitor (μF)	1,549
Reator (H)	0,1817
Fator de qualidade (Q) X_L / R	60

As figuras (3.31a) e (3.31b) mostram o comportamento do módulo da impedância e do ângulo desta, respectivamente, com a variação da frequência.

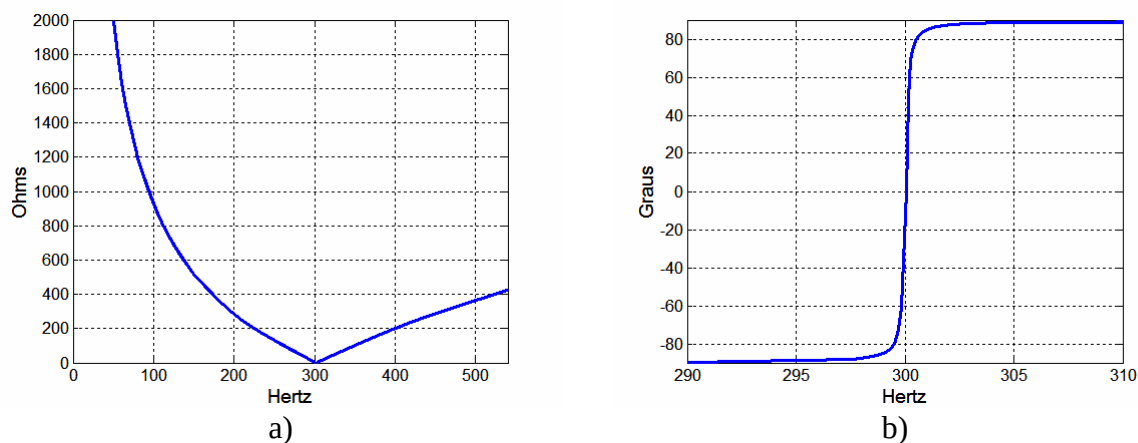


Figura 3.31 – a) Módulo da impedância do filtro em função da variação da frequência. b) Variação do ângulo da impedância do filtro com a frequência.

Novamente, das figuras (3.32a) e (3.32b) observa-se que as tensões de fase e as correntes de linha do sistema após a instalação do filtro de quinta ordem, e através da figura (3.28), um aumento global das correntes harmônicas e da fundamental com a conexão do filtro. Este fato é justificado pelo fato de que os filtros de quinta ordem, assim como os filtros de terceira ordem, não são ideais, ou seja, para o sistema, além de um caminho de baixa impedância para correntes harmônicas, os filtros representam uma carga, que demanda uma certa quantidade de energia ativa. Complementarmente, a figura (3.32) mostra o comportamento da corrente RMS no neutro do sistema com as possibilidades testadas até aqui, no que tange à utilização do filtro em derivação. A referida figura ilustra que há um aumento na corrente circulante no neutro, aumento este que se deve ao aumento global da carga que os filtros representam para o sistema, na frequência fundamental. Também, na figura (3.32) nota-se que com o filtro de 5ª. harmônica, a corrente no neutro é maior do que sem este filtro..

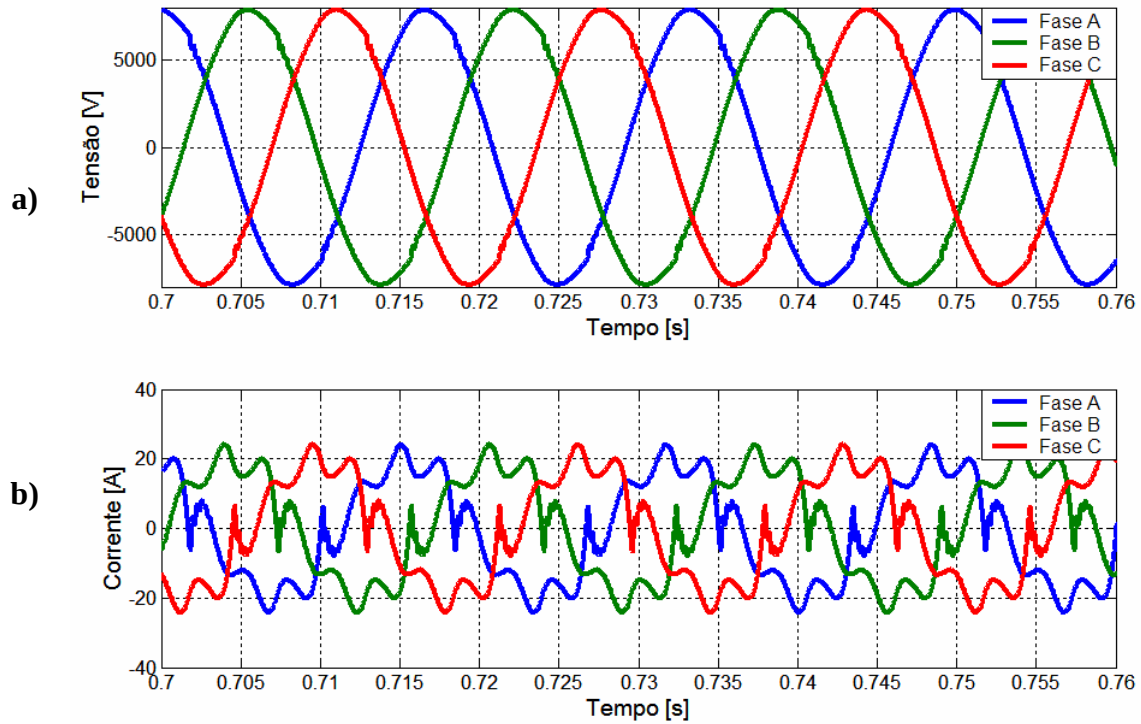


Figura 3.32 – a) Tensões de fase do sistema teste após a conexão do filtro. b) Correntes de linha do sistema teste após a conexão do filtro.

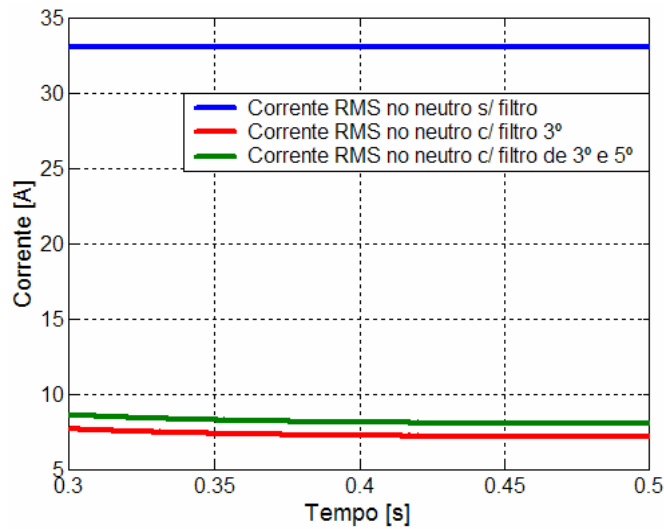


Figura 3.33 – Comparativo entre a corrente RMS que circula no neutro do transformador sem a presença dos filtros; com filtro de terceira ordem e com os filtros de terceira e quinta ordens.

A figura (3.34) mostra o espectro harmônico da tensão de fase do sistema fazendo um comparativo entre a situação sem o filtro em derivação, com o filtro de terceira ordem e com os filtros de terceira e quinta ordem.

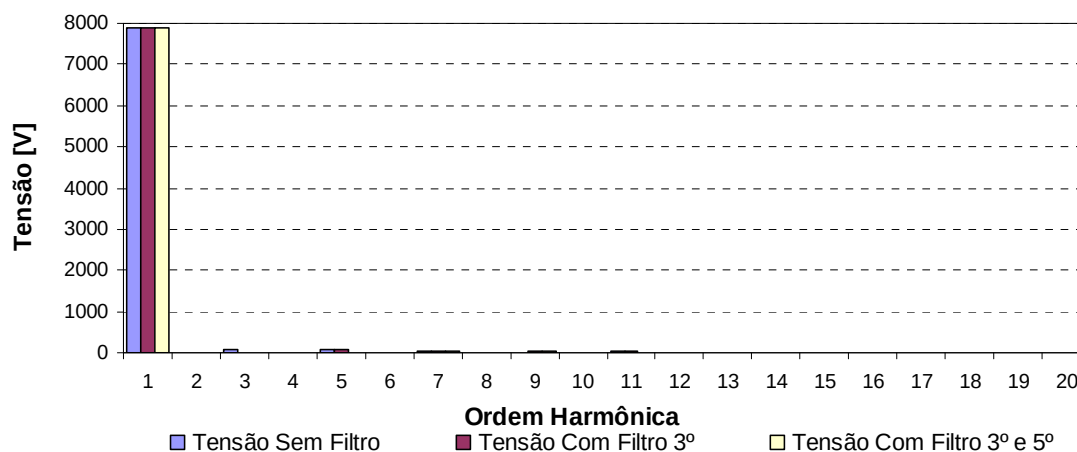


Figura 3.34 – Tensão de fase do sistema sem a presença do filtro; com o filtro de terceira ordem e com os filtros de terceira e quinta ordens.

Pode-se observar também nesta figura uma melhoria bastante discreta no nível de tensão com a implementação dos filtros de 3ª e 5ª ordens considerados.

A figura (3.35) mostra o espectro harmônico da corrente de linha do sistema nas três condições: sem a presença do filtro, com o filtro de terceira ordem e com os filtros de terceira e quinta ordens.

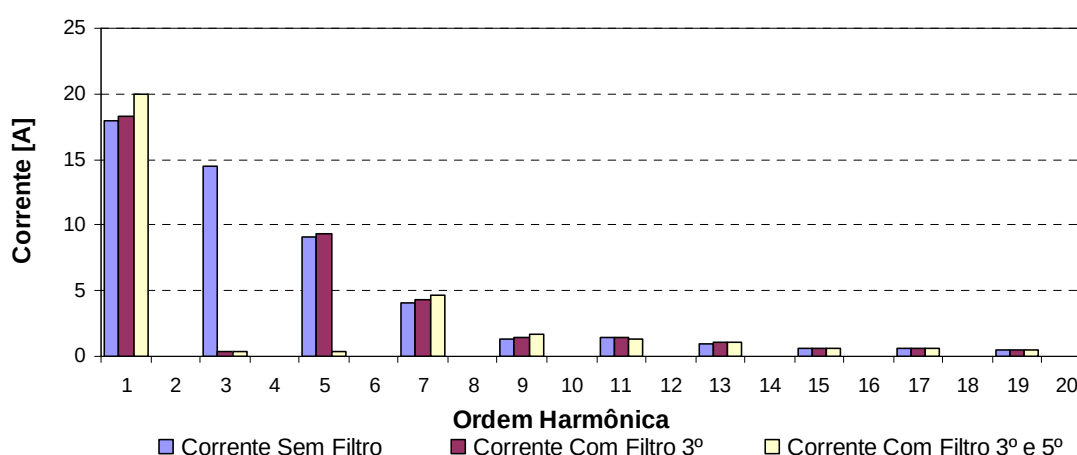


Figura 3.35 – Espectro harmônico da corrente de linha do sistema sem a presença do filtro; com o filtro de terceira ordem e com os filtros de terceira e quinta ordens.

Esta figura mostra a eficiência dos filtros para os propósitos aqui delineados, ou seja, as componentes de terceira e quinta ordens foram bastante minimizadas, resultando em uma

melhoria considerável na distorção harmônica total de corrente que, sem a presença do filtro encontrava-se em 99,15%, passando para 58,4% com o filtro de terceira ordem, e atingindo o valor de 27,08% com a atuação conjunta dos filtros de terceira e quinta ordem.

Finalmente, a figura (3.36) mostra o espectro harmônico da corrente do neutro do sistema antes e após a conexão dos filtros no sistema. É notória a eficiência do filtro de terceira ordem na minimização da corrente de mesma ordem que circula pelo neutro do sistema, assim como também é clara a ineficiência do filtro de quinta ordem para tal objetivo.

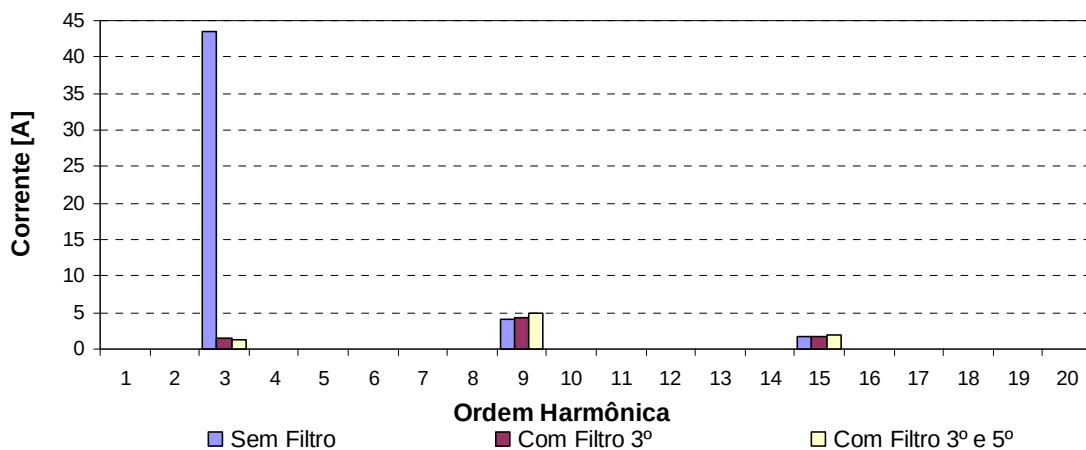


Figura 3.36 – Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes da conexão dos filtros; com filtro de terceira ordem e com os filtros de terceira e quinta ordens.

Analogamente aos casos anteriores, a figura (3.36) deixa claro o objetivo da operação dos filtros e seus resultados. Neste sentido, a eficiência dos filtros em derivação os tornam, geralmente, a medida mais apropriada para minimizar os efeitos das correntes harmônicas nos sistemas elétricos. Pode-se observar que todos os resultados estão em consonância com as bibliografias utilizadas como referência e que tratam e versam sobre o assunto [11, 12, 13, 14, 17, 19, 52].

3.2.3.3 – COMENTÁRIOS SOBRE O MODELO

Os resultados então obtidos com a ação dos filtros harmônicos ressonantes sintonizados os colocam em uma situação de grande destaque devido à sua relativa facilidade de implementação e baixa manutenção. Há de se ressaltar que, para que o desempenho do filtro seja o mais satisfatório possível, é de suma importância certos cuidados, tais como a análise prévia do fluxo de penetração harmônica, para que sejam evitadas possíveis situações de ressonâncias e, até mesmo, um estudo de alocação ótima dos filtros no sistema elétrico em que este será inserido.

3.2.4 – MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DA ESTRUTURA DE FILTRO TIPO 4

A estrutura utilizada nesta parte do trabalho consiste na operação conjunta de filtros em série e em derivação, de forma a oferecer maior abrangência na faixa de filtragem harmônica de interesse. Os filtros série utilizados, também conhecidos como bloqueadores harmônicos, foram modelados de modo a oferecer uma impedância tendendo ao infinito para as frequências de ressonância escolhidas. Tais frequências foram as de terceira e nona ordem, tendo em vista serem as predominantes no espectro harmônico da corrente de neutro. As referências [15] e [54] trazem os princípios operativos deste tipo de filtro. A outra estrutura que complementa esta aplicação é o filtro em derivação. A seção anterior descreveu o princípio de funcionamento e o dimensionamento deste filtro em questão. Assim sendo, é dispensável maiores informações sobre o mesmo.

3.2.4.1 – PRINCÍPIO OPERATIVO DO FILTRO HARMÔNICO SINTONIZADO EM SÉRIE

Os filtros em série são modelados de acordo com os princípios da ressonância paralela, onde na frequência de ressonância estes oferecem uma impedância tendendo ao infinito, de forma a bloquear o sinal sintonizado. Neste sentido, os filtros foram modelados para as frequências de terceira e nona ordens, denominados de frequências de interesse.

A figura (3.37) ilustra o diagrama resultante por fase para a conexão do filtro no sistema teste.

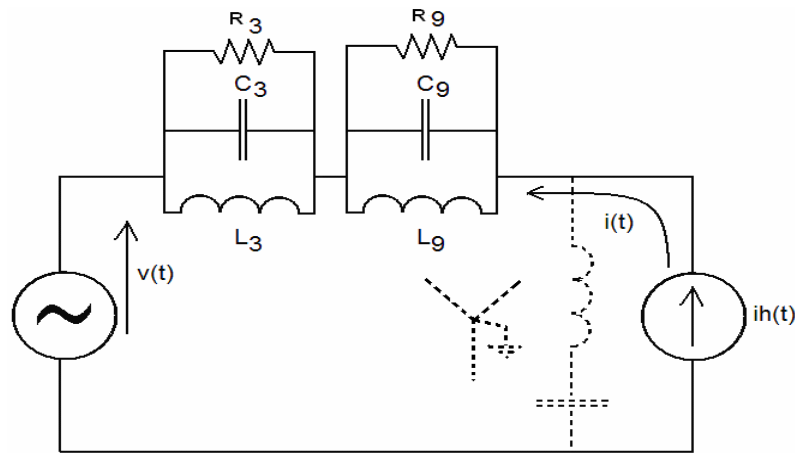


Figura 3.37 – Diagrama resultante por fase do sistema com o filtro de correntes de terceira ordem

Tendo como base o filtro para a terceira harmônica, e desprezando-se a sua resistência, a impedância equivalente do circuito ressonante na sua forma genérica (para uma dada frequência) pode ser expressa de acordo com a equação (3.15) abaixo:

$$Z_{eq} = (jX_L) // (-jX_C) \quad (3.15)$$

Desenvolvendo-se a equação (3.15) acima, resulta que:

$$Y_{eq} = \frac{1}{jX_L} + \frac{1}{-jX_C} \quad (3.16)$$

$$Z_{eq} = -j \frac{X_L \times X_C}{X_L - X_C} \quad (3.17)$$

Na frequência de ressonância, o módulo da impedância representado pela equação (3.17) assume um valor que tende ao infinito, o que faz com que o filtro em questão seja um seletor, ou melhor, um bloqueador para a frequência com que este foi sintonizado. Nas frequências abaixo e acima da frequência de ressonância, a impedância assume características indutivas e capacitivas, respectivamente.

O conceito de largura de faixa (ω_B) está intimamente ligado com a seletividade do filtro paralelo, que por sua vez é função do fator de qualidade (Q) do filtro, como definido na tabela (3.4). A largura de faixa, ou largura de banda é definida como o intervalo de frequência dentro do qual a potência dissipada é igual a metade do valor máximo. Maiores esclarecimentos sobre este parâmetro podem ser obtidos facilmente em publicações de circuitos elétricos, a exemplo da referência [55].

3.2.4.2 – DIMENSIONAMENTO DO FILTRO EM SÉRIE

O ponto de partida para o dimensionamento dos elementos R, L e C deste filtro foi, arbitrariamente, a queda de tensão máxima no indutor na frequência fundamental. Pelo fato de a impedância equivalente do filtro assumir característica indutiva à frequência fundamental, a

queda de tensão sobre tal reatância foi limitada em 1% do valor da tensão fundamental. Assim sendo, a inequação (3.18) foi utilizada como marco inicial para o cálculo dos elementos:

$$\Delta V_{ZF} \leq 0,01 \times V_f \quad (3.18)$$

Onde:

ΔV_{ZF} : Queda de tensão (*RMS*) na impedância do filtro à frequência fundamental;

V_f : Tensão (*RMS*) à frequência fundamental.

A simulação do sistema teste sem a presença dos filtros mostra que o módulo da tensão (V_f) e da corrente (I_f) foram de 7,876 kV e 17,94 A, respectivamente. Desenvolvendo a inequação (3.18) de forma a igualar a queda de tensão em questão obtida com o produto da corrente à frequência fundamental (ω_f) pela impedância do filtro concomitantemente à fundamental observa-se a equação (3.19), que permite dimensionar a indutância do filtro: Assim,

$$L = \frac{0,01 \times V_f}{\omega_f \times I_f} \quad (3.19)$$

Com a obtenção da indutância do filtro, a capacitância pode ser encontrada pelo uso da equação (3.20);

$$\left(\omega_0 C - \frac{1}{\omega_0 L} \right) = 0 \quad (3.20)$$

Onde:

ω_0 : frequência angular de ressonância.

A equação (3.20) acima estabelece que a parte imaginária da admitância do filtro é zero à frequência de ressonância. Desta forma, a capacitância será:

$$C = \frac{1}{\omega_0^2 \times L} \quad (3.21)$$

Para a determinação da resistência acoplada em paralelo com o circuito tanque (LC), o conceito de largura de faixa foi adotado, de forma a garantir que a curva de resposta do filtro seja bem estreita, de modo a oferecer uma oposição bem definida à terceira harmônica. Diante do exposto, a resistência pode ser encontrada pela equação (3.22) a seguir:

$$\omega_B = \frac{1}{RC} \quad (3.22)$$

Onde:

ω_B : largura de banda.

Os elementos do filtro de nona ordem foram dimensionados de forma análoga ao filtro de terceira ordem. De forma a resumir os resultados da modelagem dos elementos constituintes do filtro, a tabela (3.8) mostra os valores encontrados pela aplicação das equações pertinentes a este tipo de filtro, ora discutido.

Capítulo III – Modelagem e Implementação Computacional dos Filtros de Correntes de Sequência Zero em sistema teste.

Tabela 3.8 – Resumo dos parâmetros dos filtros de 3ª e 9ª ordens modelados.

	3ª ordem	9ª ordem
Indutância (L)	11,64 mH	7,431 mH
Capacitância (C)	69,46 μ F	11,689 μ F
Resistor	1682 Ω	10.637 Ω
Frequência de sintonia (n)	2,9	8,9
Fator de qualidade (Q)	130	130

As figuras (3.38a), (3.38b) e (3.38c) e (3.38d) mostram a variação do módulo da impedância série e o seu ângulo para o filtro de terceira e nona ordens, respectivamente.

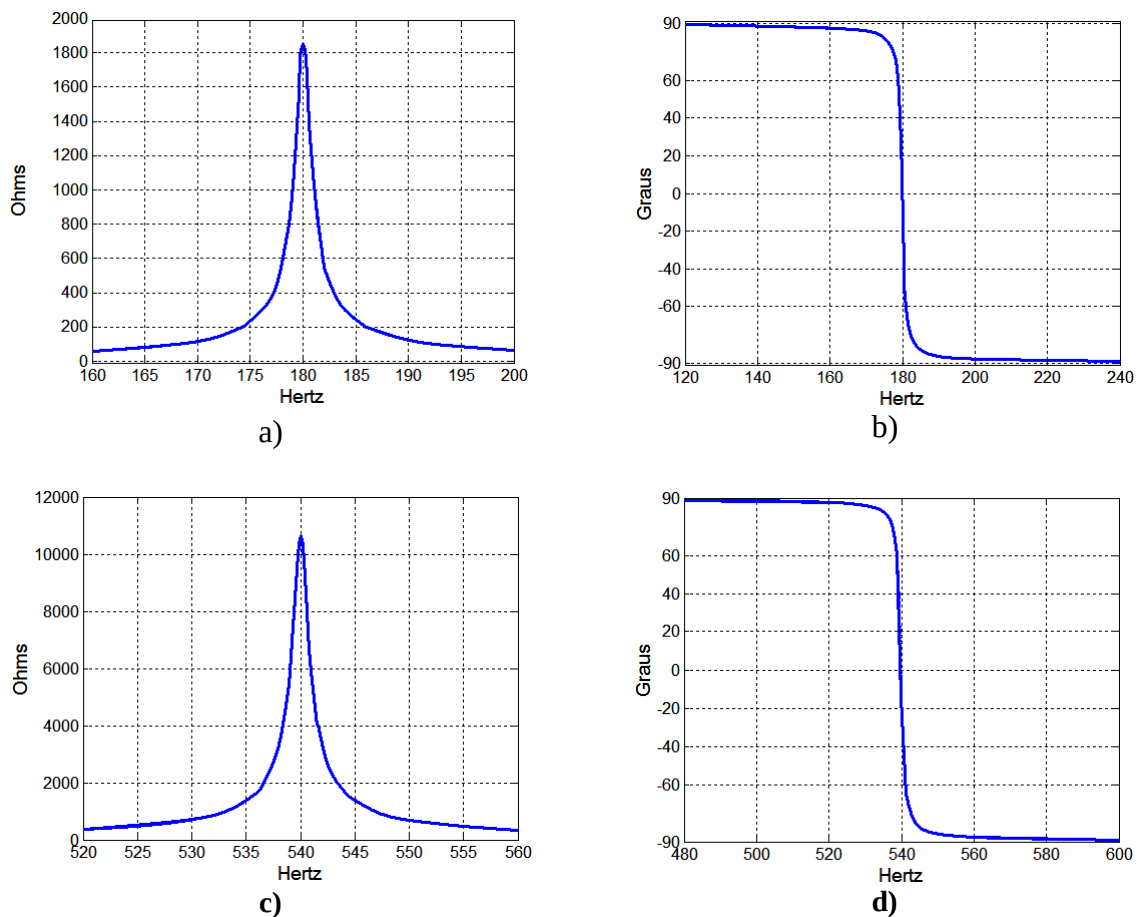


Figura 3.38 – a) e c): Módulo da impedância do filtro de 3ª e 9ª ordem em função da variação da frequência. b) e d) Variação do ângulo da impedância do filtro de 3ª e 9ª ordem com a frequência

Assim, pelas figuras (3.38a), (3.38c) e (3.38b) e (3.38d) acima, é possível observar que, quando na frequência de sintonia dos filtros, os módulos das impedâncias destes ficam limitados ao valor do resistor colocado em paralelo com os elementos capacitivo e indutivo.

Isto acontece devido ao fato de o circuito tanque (LC) apresentar uma impedância tendendo a infinito e o ângulo desta impedância tender à zero, ou seja, representando um circuito aberto, de acordo com a equação (3.17), cabendo ao elemento puramente resistivo (R) fornecer o caminho de passagem para a corrente de terceira e nona ordens.

Com a determinação dos elementos do filtro de terceira e nona ordens a implementação deste no sistema teste foi realizado. Para a verificação do desempenho deste filtro, a figura (3.39) mostra uma comparação entre a tensão de fase do sistema sem e com a conexão dos filtros de terceira e nona ordens. Nestas figuras é possível ainda observar que, quando da presença do filtro de terceira ordem a distorção de tensão provocada pela queda de tensão na impedância do filtro é significativa, o que era de se esperar conforme considerado no critério utilizado para dimensionamento, de acordo com o exposto e expresso na equação (3.18).

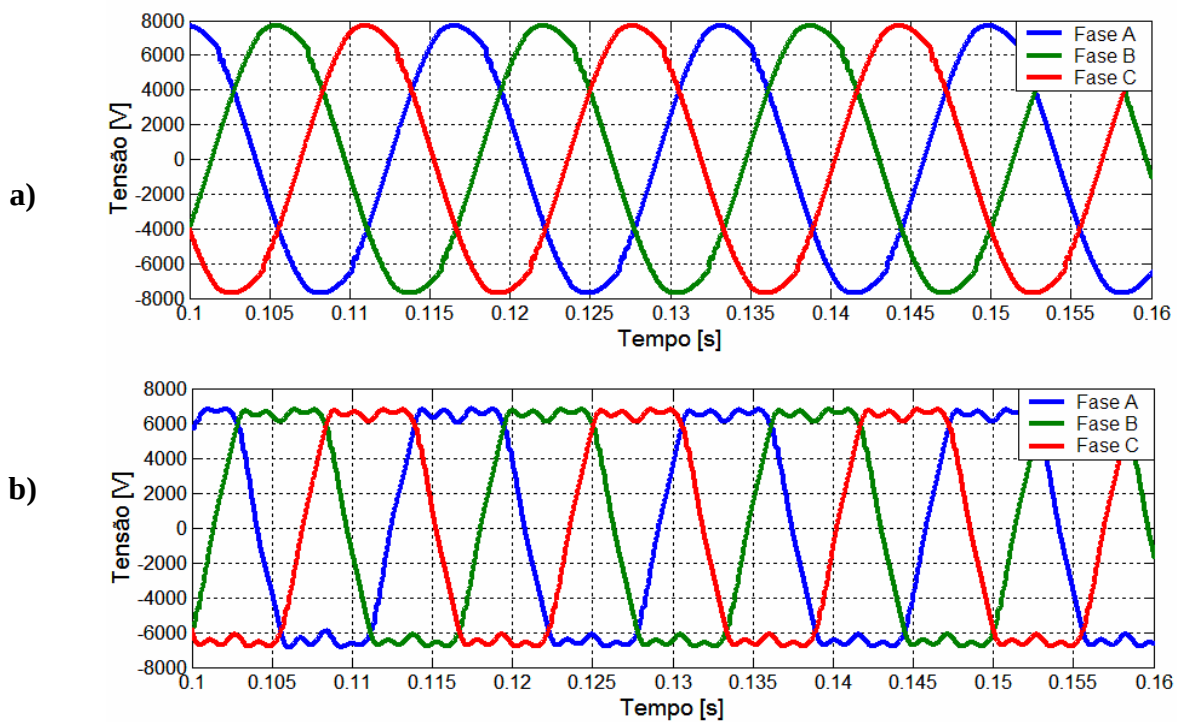


Figura 3.39 – a) Tensões de fase do sistema teste antes da conexão dos filtros. b) Tensões de fase do sistema teste após da conexão dos filtros.

Analogamente à apresentação dos resultados dos filtros no que tange ao desempenho, a figura (3.40) mostra a corrente de linha antes e após a conexão dos filtros e também o efeito bloqueador dos filtros de terceira e nona harmônica. É importante observar que o fator de crista da corrente de linha sem os filtros é bastante acentuado, em contraste com a corrente de linha com os filtros acoplados. Devido ao fato de os filtros oferecerem uma pequena impedância à fundamental, a amplitude da corrente é menor com os filtros acoplados do que com o sistema sem os filtros em série. Neste sentido a figura (3.41) mostra a corrente *RMS* no neutro sem e com os filtros acoplados, podendo-se observar a sensível redução da corrente que circula no neutro.

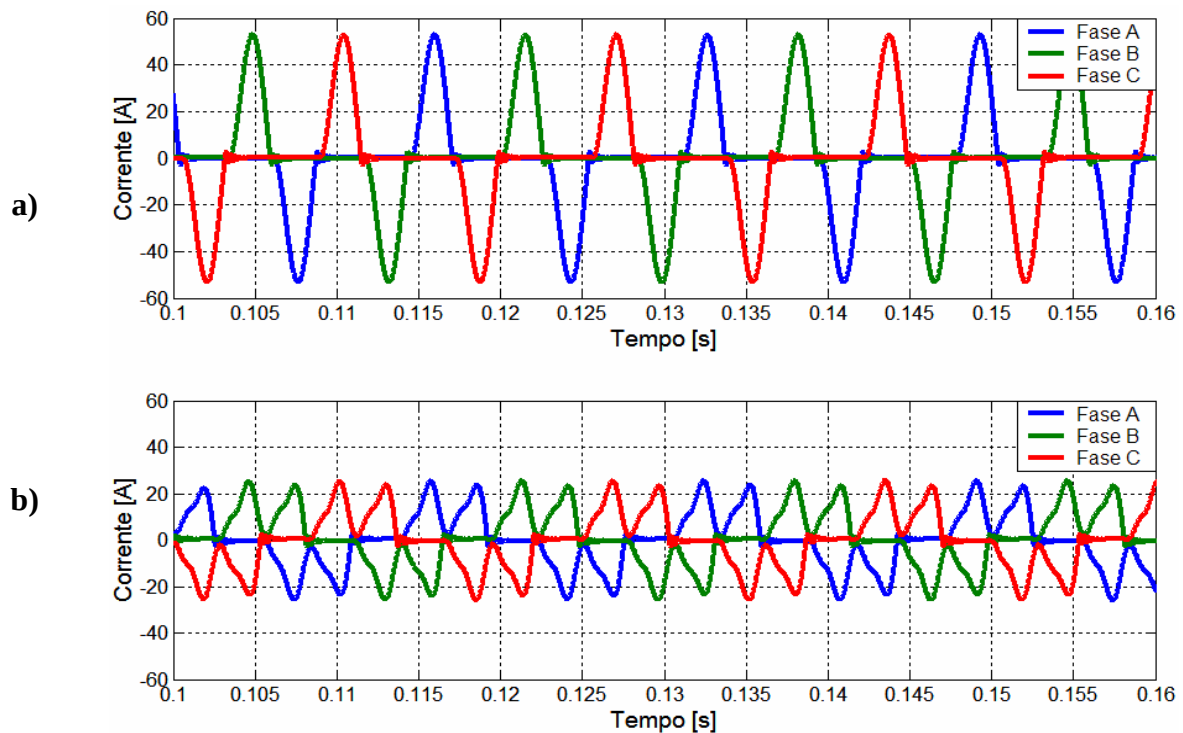


Figura 3.40 – a) Corrente de linha do sistema teste antes da conexão dos filtros. b) Corrente de linha do sistema teste após da conexão dos filtros.

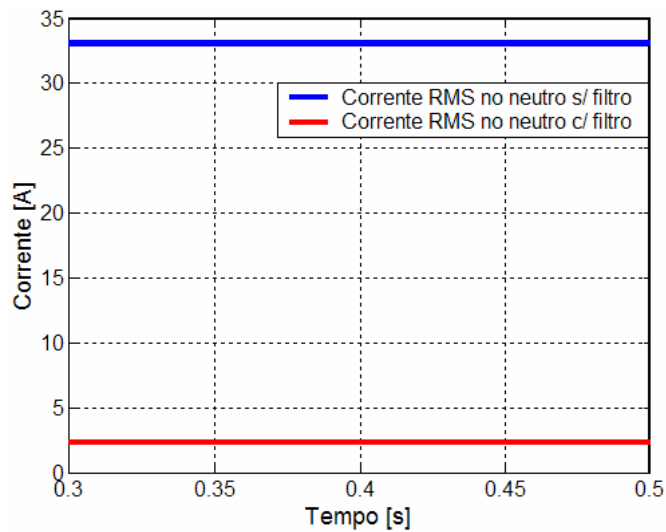


Figura 3.41 – Comparativo entre a corrente RMS que circula no neutro do transformador sem e com a presença dos filtros de 3ª e 9ª ordens.

As figuras (3.40) e (3.41) mostram a eficiência dos filtros harmônicos conectados em série com o sistema e as figuras (3.42), (3.43) e (3.44) mostram, respectivamente o espectro harmônico das tensões de fase, corrente de linha e corrente no neutro do sistema antes e após a conexão dos filtros.

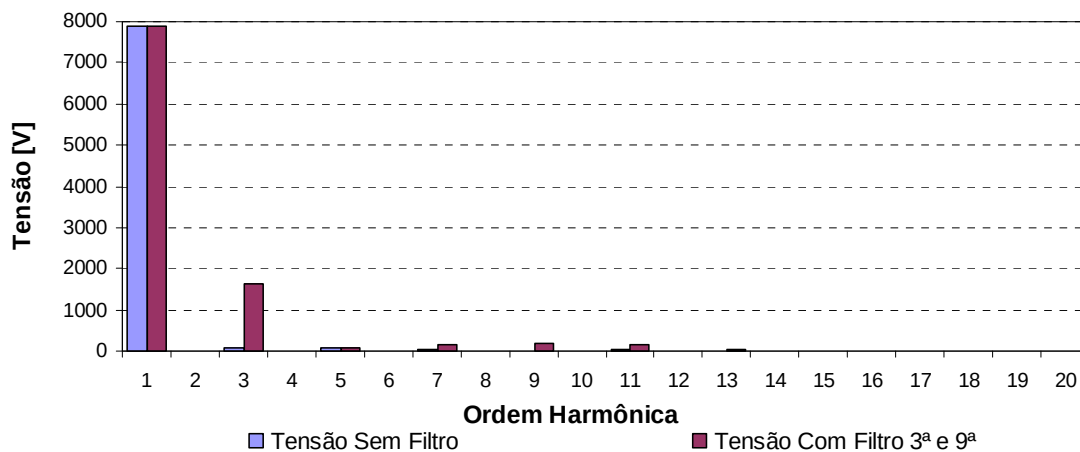


Figura 3.42 – Espectro harmônico da tensão de fase do sistema antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 9ª ordens.

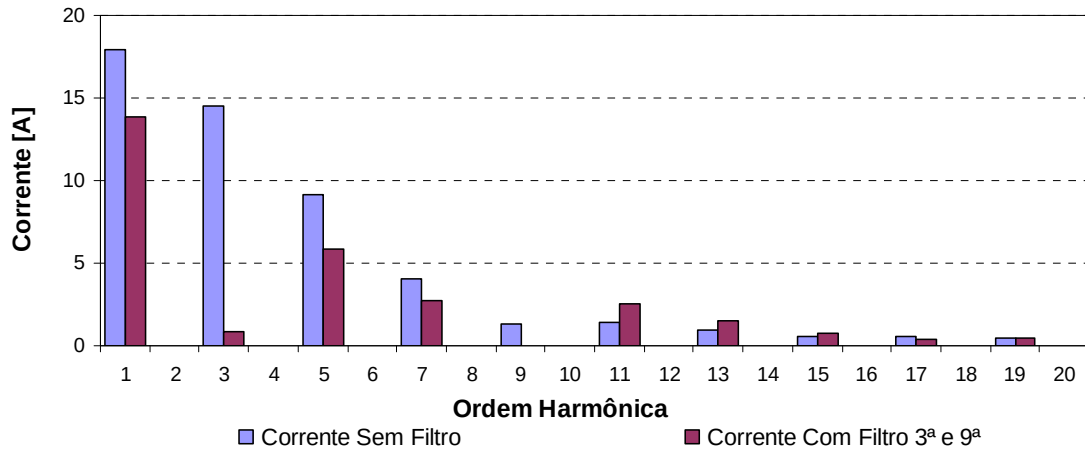


Figura 3.43 – Espectro harmônico da corrente de linha do sistema antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 9ª ordens.

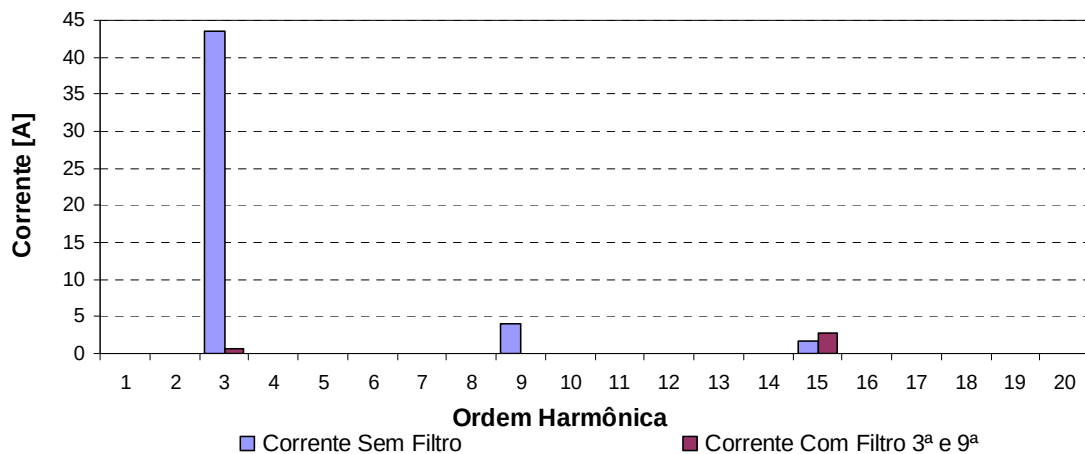


Figura 3.44 – Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 9ª ordens.

A eficiência dos filtros em série é conseguida mediante um custo bastante elevado, gerado pelo aumento da distorção de tensão devido a queda de tensão na impedância harmônica dos filtros. Com o objetivo de diminuir esta distorção, foi inserido um filtro em derivação com a carga. O referido filtro foi modelado de forma idêntica aos filtros modelados no item 3.23, sendo, desta forma, dispensável maiores detalhes sobre a modelagem destes.

Uma inspeção nos espectros harmônicos das figuras (3.43) e (3.44) é possível observar que a ordem harmônica predominante na tensão de fase é a terceira, e que as ordens harmônicas predominantes na corrente de linha são as harmônicas de quinta e sétima ordem.

A partir dessas informações, foram modelados dois filtros harmônicos em derivação, um para a terceira ordem (estrela aterrada) e outro para a quinta ordem (delta), com o objetivo de obter melhorias dos índices de distorção harmônica da tensão e da corrente.

A tabela (3.9) resume o valor dos parâmetros dos filtros em derivação de terceira (em estrela aterrada) e quinta ordens (em delta), assim obtidos.

Tabela 3.9 – Resumo dos parâmetros dos filtros* de 3ª e 5ª ordem modelados.

	3ª ordem	5ª ordem
Indutância (L)	966,85 mH	217,48 mH
Capacitância (C)	0,8086 μ F	0,4313* μ F
Resistor	0,2 Ω	0,2 Ω
Fator de qualidade (Q)	60	60

*: Valores para ligação em delta.

As figuras (3.45a) e (3.45b) mostram as formas de onda da tensão de fase antes e após a conexão dos filtros em derivação para 3ª e 5ª ordens.

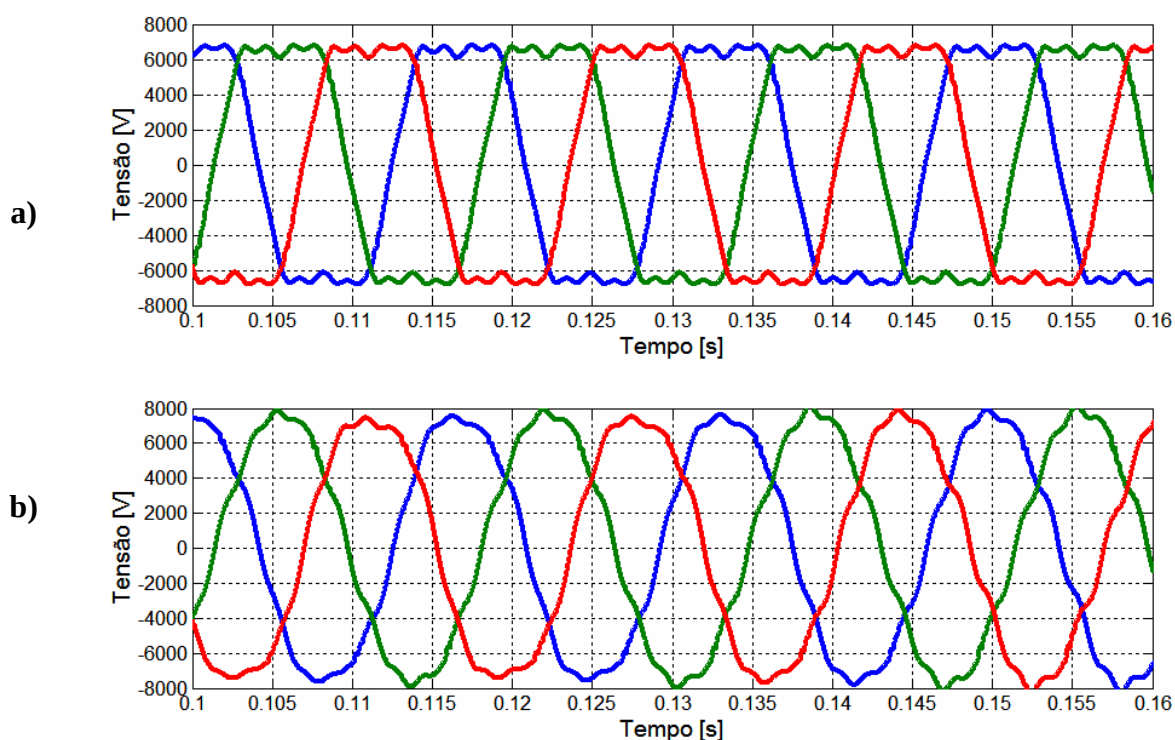


Figura 3.45 – a) Tensões de fase do sistema teste antes da conexão dos filtros em derivação. b) Tensões de fase do sistema teste após a conexão dos filtros em derivação.

A ação dos filtros em derivação fica evidente através da inspeção das formas de onda da figura (3.45), que se aproximaram de uma senóide, o que caracteriza uma distorção harmônica de tensão minimizada, variando de 21,22%, sem os filtros em paralelo, para apenas 4,62% com a presença dos filtros. Assim, as figuras (3.46a) e (3.46b) mostra a ação dos filtros em paralelo sobre a corrente do sistema.

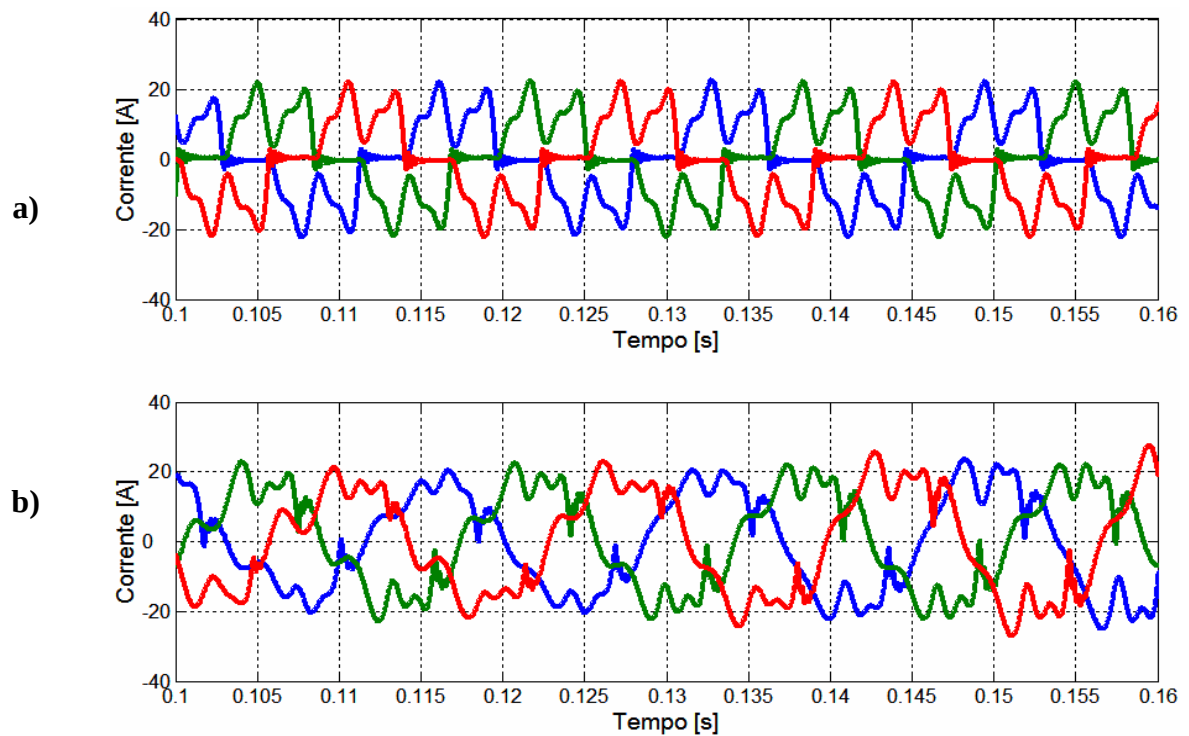


Figura 3.46 – a) Correntes de linha do sistema teste antes da conexão dos filtros em derivação. b) Correntes de linha teste após da conexão dos filtros em derivação.

A figura (3.47) de maneira comparativa mostra a corrente *RMS* no neutro do sistema antes e após a conexão do filtro. Nesta figura observa-se um aumento na corrente que circula pelo neutro, justificada pela redução da impedância dos filtros em derivação à frequência fundamental.

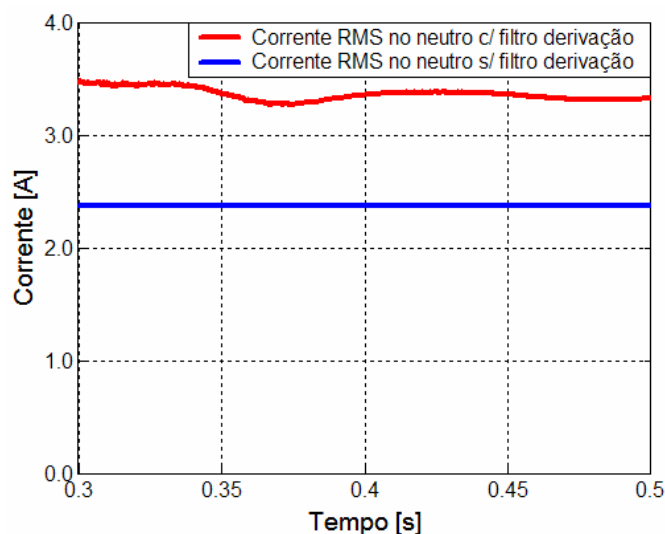


Figura 3.47 – Comparativo entre a corrente RMS que circula no neutro do transformador sem e com a presença dos filtros de 3ª e 5ª ordens em derivação.

Finalmente as figuras (3.48), (3.49) e (3.50) a seguir resumem as melhorias impostas na eficiência dos filtros série com a conexão dos filtros em derivação, fato este constatado se forem comparados com aqueles das figuras (3.42), (3.43) e (3.44).

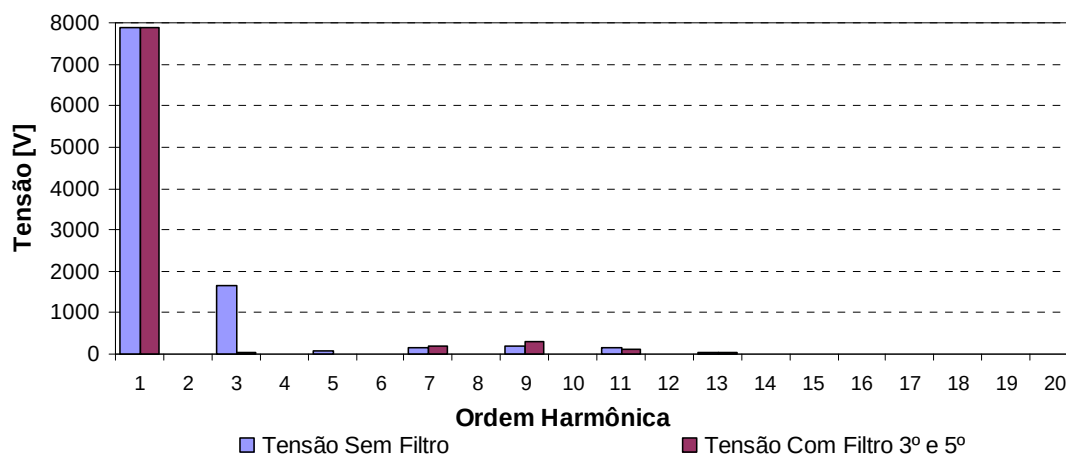


Figura 3.48 – Espectro harmônico da tensão de fase do sistema antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 5ª ordens em derivação.

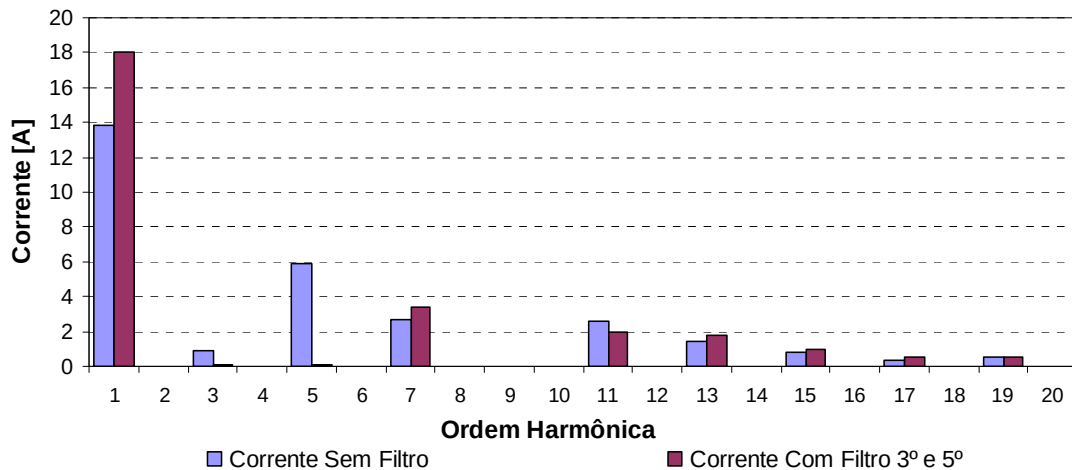


Figura 3.49 – Espectro harmônico da corrente de linha do sistema antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 5ª ordens em derivação.

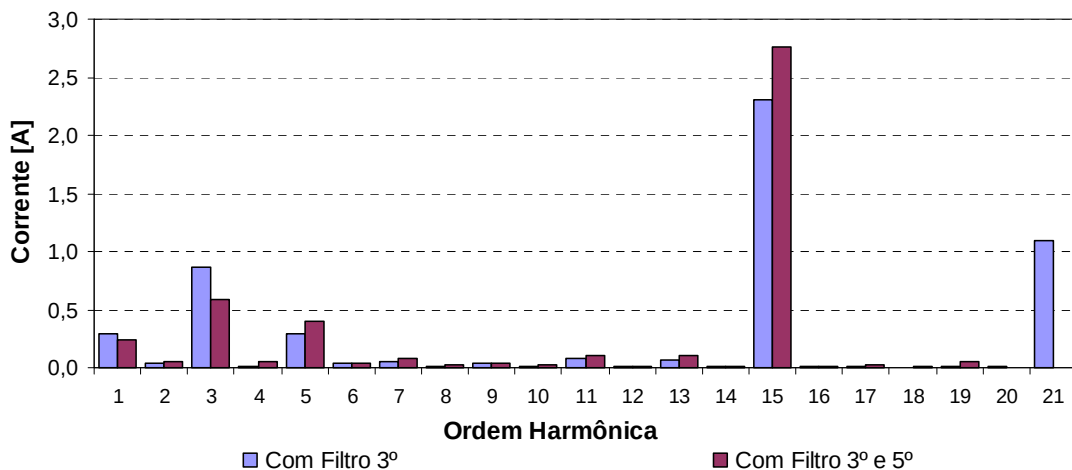


Figura 3.50 – Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 5ª ordens.

3.2.4.3 – COMENTÁRIOS SOBRE O MODELO

Dos resultados acima obtidos, de uma forma bem objetiva, deixam clara a eficiência da operação conjunta de filtros harmônicos em derivação e em série, no que diz respeito à circulação de correntes harmônicas nas fases, no neutro do sistema e à distorção harmônica das tensões de fase.

A operação individual de filtros bloqueadores (em série) apresenta excelente desempenho no que tange à circulação de correntes nas fases e no neutro do sistema, mas insuficiente no que se refere à distorção harmônica total de tensão, devido à queda de tensão na impedância harmônica do próprio filtro.

A operação em conjunto dos filtros acima discutidos (filtros série/paralelo) possibilitou a determinação de um ponto de operação mais apropriado, do ponto de vista da tensão e da corrente, como pôde ser observado nos resultados apresentados.

3.2.5 – MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DA ESTRUTURA DE FILTRO TIPO 5

O filtro proposto neste item emprega a mesma filosofia utilizada no filtro em série do item anterior, com a vantagem de estar acoplado ao neutro, o que resulta em uma economia de dois outros filtros em comparação ao filtro do item anterior, resultando assim em três filtros acoplados às fases. As referências [15] e [21] descrevem o funcionamento e as vantagens da utilização desses filtros, em maiores detalhes.

3.2.5.1 – DIMENSIONAMENTO DO FILTRO EM SÉRIE NO NEUTRO

Sendo o princípio operativo do filtro ora estudado, idêntico ao filtro descrito no item anterior, ficam aqui desnecessários demais detalhes sobre sua modelagem, o que tornaria uma redundante. Deve ser salientado que na modelagem do filtro, o ponto de partida para a sua

modelagem foi uma limitação de queda de tensão sobre sua impedância harmônica em 0,5% em relação à tensão de fase nominal. Outro fato relevante é que foi utilizado somente filtro para a terceira harmônica devido à intensidade desta componente na corrente de neutro.

A figura (3.51) a seguir mostra o diagrama esquemático da ligação do filtro com o sistema teste, e a tabela (3.7) resume as informações dos parâmetros do filtro utilizado.

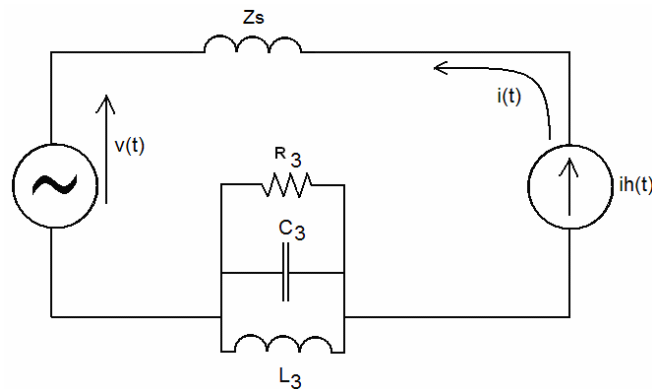


Figura 3.51 – Diagrama resultante por fase do sistema com o filtro de correntes de terceira ordem.

A tabela (3.10) resume os parâmetros do filtro de 3ª ordem utilizado.

Tabela 3.10 – Resumo dos parâmetros do filtro de 3ª ordem dimensionado.

Indutância (L)	5,82 mH
Capacitância (C)	134,27 μ F
Resistor	885,6 Ω
Fator de qualidade (Q)	130

A menos da vantagem da economia de componentes para dois filtros, a operação deste filtro é idêntica à operação dos filtros do item anterior. As figuras (3.52a) e (3.52b) mostram os resultados da simulação para as tensões de fase antes e depois da conexão do filtro no neutro do sistema, respectivamente.

Seguindo a mesma linha de apresentação de resultados dos filtros na simulação, as figuras (3.53a) e (3.53b) mostram as correntes de linha antes e após a conexão do filtro no neutro sistema.

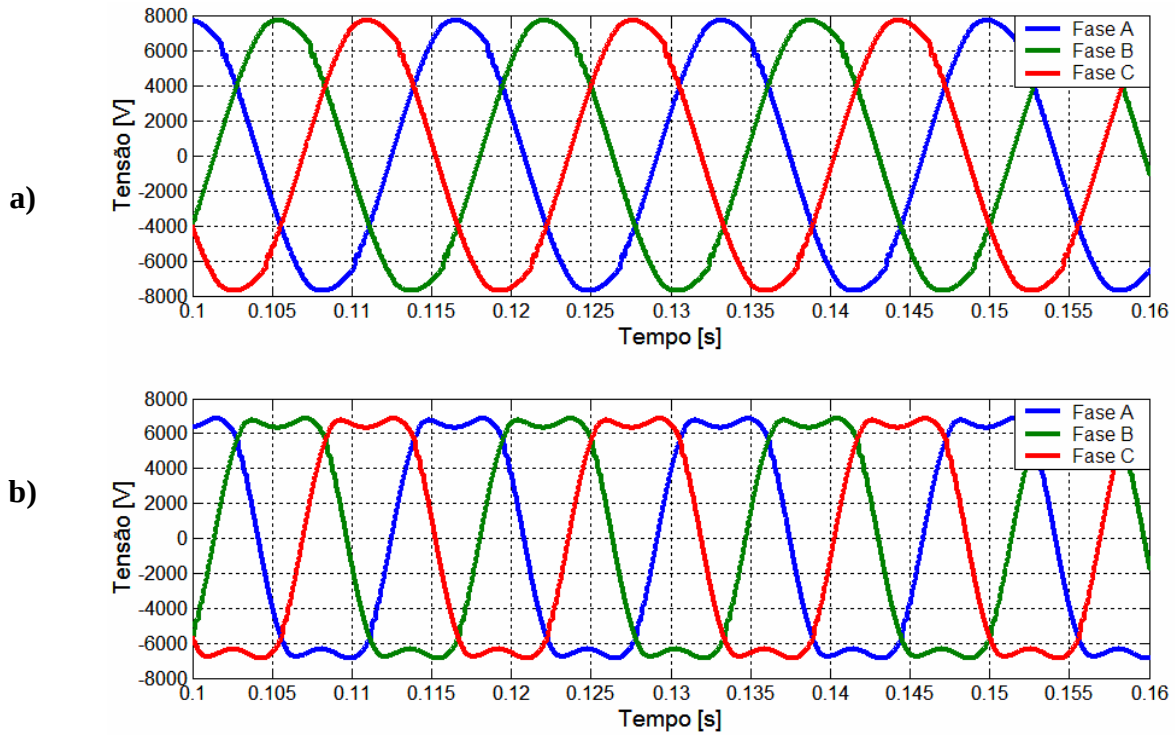


Figura 3.52 – a) Tensões de fase do sistema teste antes da conexão do filtro série no neutro. b) Tensões de fase do sistema teste após da conexão do filtro no neutro do sistema.

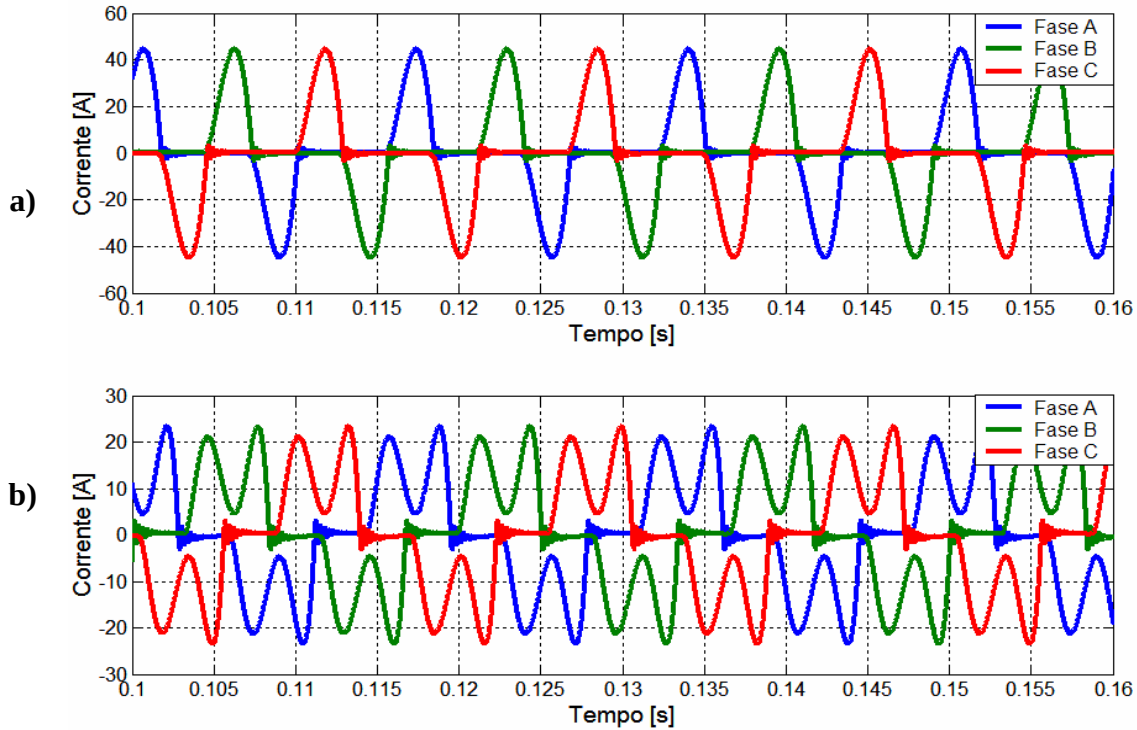


Figura 3.53 – a) Correntes de linha do sistema teste antes da conexão do filtro no neutro do sistema. b) Correntes de linha teste após da conexão do filtro no neutro do sistema.

A figura (3.54) mostra a corrente *RMS* no neutro do sistema antes e após a conexão do filtro, e como esperado, a corrente no neutro sofreu uma significativa redução.

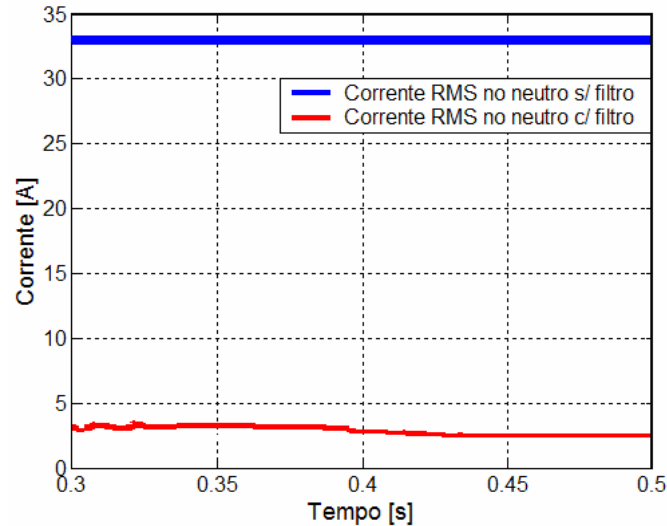


Figura 3.54 – Comparativo entre a corrente *RMS* que circula no neutro do transformador da saída do alimentador sem e com a presença do filtro de 3ª ordem no neutro.

As figuras (3.55), (3.56) e (3.57) resumem as informações em termos de espectro harmônico sobre a atuação do filtro harmônico considerado nessa seção, para a tensão de fase, corrente de linha de neutro, respectivamente para o sistema.

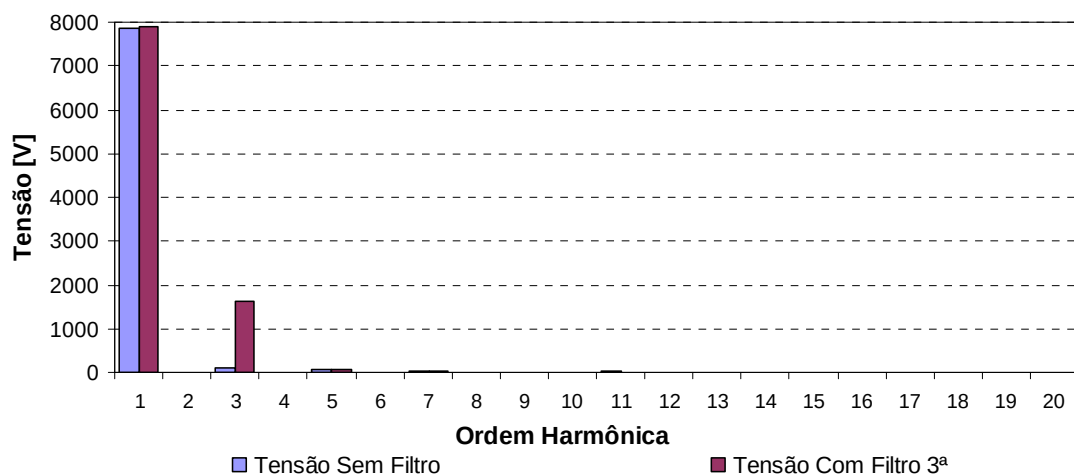


Figura 3.55 – Espectro harmônico da tensão de fase do sistema antes e após a conexão do filtro de 3ª ordem no neutro do sistema.

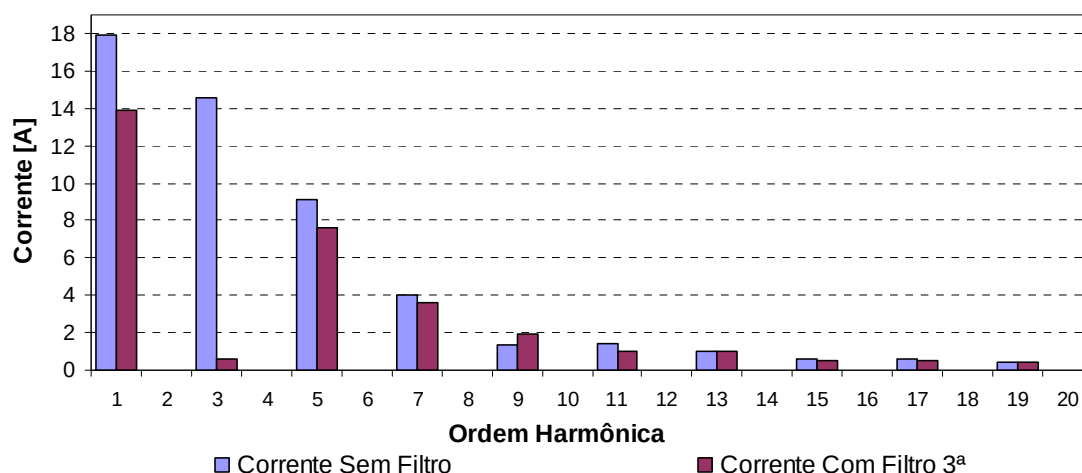


Figura 3.56 – Espectro harmônico da corrente de linha do sistema antes e após a conexão do filtro de 3ª ordem.

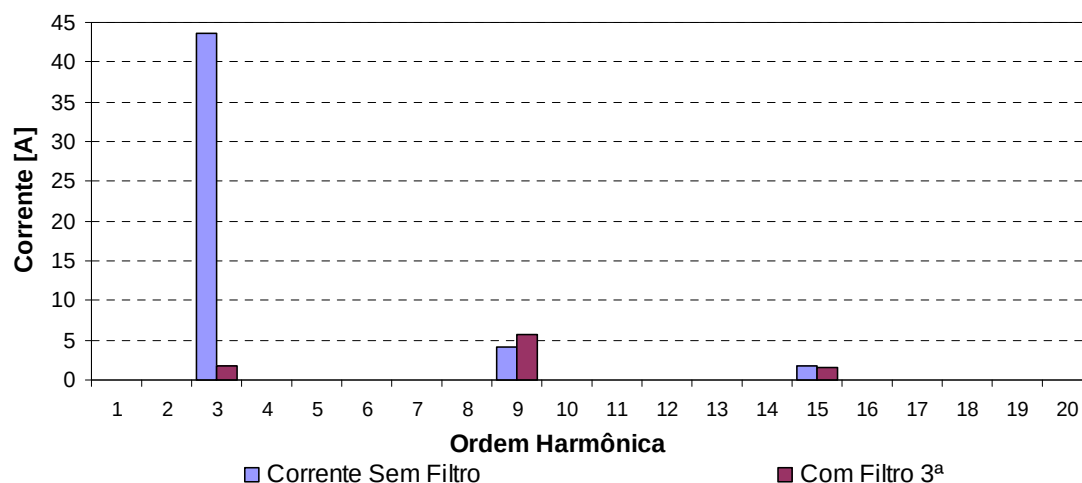


Figura 3.57 – Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após a conexão do filtro de 3ª ordem.

3.2.5.2 – COMENTÁRIOS SOBRE O MODELO

A estratégia de operação deste filtro é idêntica àquela adotada no filtro em série da seção anterior, resguardando consigo a vantagem da economia devido à instalação ao neutro do sistema, ao invés da instalação nas 3 fases, tal como o filtro da seção anterior.

A distorção harmônica de tensão ocorre semelhantemente ao do filtro anterior, devido à queda de tensão na impedância harmônica no neutro, ocasionando o deslocamento do neutro, como ficou evidenciado na figura (3.53b). Esta distorção causa, como já foi dito em seções anteriores, uma diminuição na suportabilidade dos dispositivos usando recursos da eletrônica de potência, considerando que, o link DC destes equipamentos terá um valor menor que o nominal, como consequência da diminuição do valor de pico da tensão de entrada.

3.3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo teve o objetivo de analisar o princípio operativo dos filtros propostos para este trabalho e suas modelagens computacionais, no que tange ao funcionamento em um sistema teste ideal, ou seja, com uma fonte de corrente harmônica trifásica, simétrica e equilibrada. Todos os resultados obtidos nesta etapa do trabalho estão em plena consonância com os resultados obtidos nas bibliografias utilizadas como referência.

A primeira estrutura avaliada foi um banco de três transformadores monofásicos interconectados em zig-zag, de forma a fornecer um caminho de baixa impedância para correntes de seqüência zero. Os resultados foram satisfatórios no que diz respeito à minimização da circulação das correntes de seqüência zero no neutro do sistema.

A segunda estrutura avaliada foi um filtro harmônico conectado em série e sintonizado na frequência fundamental do sistema (60 Hz), de forma a apresentar uma alta impedância para as outras ordens harmônicas. A principal vantagem desse filtro é a sua grande seletividade com relação à corrente, mas deixa a desejar em sua eficiência no que tange à distorção harmônica de tensão, devido a elevada queda de tensão sobre a impedância harmônica. Não é um método muito utilizado justamente devido a esta característica.

A terceira estrutura considerada é composta por filtros harmônicos sintonizados em derivação, de forma a fornecer um caminho de baixa impedância à corrente a qual o filtro está sintonizado. É uma solução atrativa e bastante utilizada pela sua relativa facilidade de projeto, baixa manutenção e confiabilidade. Os resultados obtidos com este filtro foram bastante satisfatórios. A principal desvantagem deste filtro é a possibilidade de ocorrer ressonância com alguma outra fonte de tensão ou corrente que esteja presente no sistema ao qual o filtro está inserido, injetando neste um sinal de mesma frequência para a qual o filtro foi sintonizado. Devido a este fato, o dimensionamento do filtro deve ser realizado mediante criteriosa análise de penetração harmônica, quando possível.

A quarta estrutura foi concebida pela junção dos filtros em série sintonizados nas frequências de 3ª e 9ª ordens, e em derivação nas frequências de 3ª e 5ª ordens. A operação conjunta dos dois filtros resultou na estrutura que melhor atendeu às expectativas, operando satisfatoriamente tanto na corrente quando na tensão do sistema. Obviamente é a opção que talvez seja a mais onerosa, por se tratar de uma estrutura composta por dois tipos de filtros diferentes, e essa, com certeza é a sua principal desvantagem.

E por fim, a quinta estrutura é uma modificação de parte da estrutura utilizada na seção 3.2.4. Um filtro de terceira ordem foi acoplado ao neutro do sistema, de forma a oferecer alta impedância para a corrente na frequência a qual ele foi sintonizado. Os resultados obtidos são bastante consistentes e coincidentes com os obtidos com a parte do filtro em série da quarta estrutura. A principal vantagem desta estrutura é a economia que se obtém com a conexão de apenas um filtro em série com o neutro do sistema.

Finalmente, para uma avaliação comparativa sucinta dos 5 tipos de filtros aqui focalizados, a tabela (3.11) apresenta suas principais características.

Capítulo III – Modelagem e Implementação Computacional dos Filtros de Correntes de Sequência Zero em sistema teste.

Tabela 3.11 – Quadro resumo dos tipos de filtros considerados.

Tipo	Características	Desempenho
Tipo 1	Filtro eletromagnético constituído por três unidades monofásicas, em zig-zag.	O filtro em questão apresentou desempenho considerável, no que diz respeito à redução do fluxo de correntes de sequência zero nas fases e no neutro do sistema, devido à baixa impedância de sequência zero que esta estrutura oferece, como mostrado nos resultados das simulações. Contudo, a desvantagem deste tipo de filtro é que, se houver qualquer tensão harmônica de sequência zero sendo gerada pelo sistema, haverá, pelo filtro, o fluxo de corrente de mesma ordem da referida tensão. Por outro lado, para as demais correntes de sequência positiva e negativa estas características não foram observadas.
Tipo 2	Filtro LC série sintonizado na frequência fundamental, em série com a linha.	O referido filtro apresentou-se extremamente eficiente na filtragem, semelhantemente ao encontrado em algumas referências, no bloqueio de correntes harmônicas. Observou-se que a corrente no neutro do sistema apresentou uma redução significativa, devido à sua elevada impedância para as correntes harmônicas. Porém, a queda de tensão harmônica sobre a impedância harmônica do filtro se revela como a principal desvantagem. Neste aspecto, quanto maior for o conteúdo harmônico de corrente no sistema, maior se fará presente a distorção de tensão no ponto após o filtro.
Tipo 3	Filtro LC série sintonizado nas frequências de 3ª e 5ª ordens, em derivação.	O filtro em derivação aqui avaliado apresentou-se eficiente em seu propósito, ou seja, na filtragem das correntes nas quais estes foram sintonizados. A corrente no neutro sofreu uma redução significativa, tendo em vista que a corrente de 3ª ordem ser a responsável pelo elevado fluxo de corrente no neutro. A principal desvantagem observada para este tipo de filtro é a possível ocorrência de ressonância com o sistema.
Tipo 4	Filtro LC paralelo sintonizado nas frequências de 3ª e 9ª ordens, em série com a linha, em conjunto com filtros sintonizados nas frequências de 3ª e 5ª ordens, conectados em derivação.	Os filtros em série mostraram-se eficientes na filtragem, ou no bloqueio, das correntes na qual estes foram sintonizados (3ª e 9ª ordens). Entretanto, o efeito da queda de tensão harmônica na impedância dos filtros foi significativa, fazendo-se necessária a instalação de filtros em derivação sintonizados nas frequências de 3ª e 5ª ordens, de forma a minimizar o conteúdo harmônico de tensão e corrente no sistema. A ação conjunta dos referidos filtros apresentou-se eficaz na redução do fluxo de corrente no neutro do sistema. A principal desvantagem deste tipo de filtro é a utilização de quatro filtros por fase, onerando a sua utilização.
Tipo 5	Filtro LC paralelo sintonizado na 3ª harmônica, conectado em série com o neutro do sistema.	A filosofia deste tipo de filtro é idêntica à do tipo 4, porém, com a vantagem de ser instalada ao neutro, de forma a necessitar de apenas um filtro, ao invés de três, se fossem instalados nas três fases. Este tipo de filtro mostrou-se eficiente na redução substancial do fluxo de corrente no neutro. A principal desvantagem deste filtro, entretanto, é gerada pela queda de tensão harmônica na impedância do filtro, ocasionando o deslocamento da tensão de neutro, podendo gerar, por exemplo, o mau funcionamento de equipamentos de controle, ao se utilizar como referência a passagem por zero da tensão.

Findados os trabalhos de modelagem computacional dos filtros contemplados por esta dissertação, a seqüência dos trabalhos se dará com o decorrer do capítulo IV, onde é abordado o funcionamento dos mesmos filtros aqui modelados em um sistema de distribuição, contendo todas as suas características reais, ou seja, com toda a sorte de não conformidades observadas na prática. Tais não conformidades podem ser descritas como sendo: desequilíbrios de tensão/corrente, correntes harmônicas, cargas monofásicas, ressonâncias, entre outros.

CAPÍTULO IV

APLICAÇÃO DE FILTROS HARMÔNICOS PASSIVOS LC E ELETROMAGNÉTICOS NA MINIMIZAÇÃO DE CORRENTES DE SEQÜÊNCIA ZERO EM SISTEMAS AÉREOS DE DISTRIBUIÇÃO

4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Atualmente sistemas trifásicos a quatro fios multi-aterrados estão sendo largamente empregados em sistemas de distribuição modernos, devido a sua capacidade de prover um perfil de tensão mais estável e confiável [56].

Neste capítulo serão avaliados os filtros modelados no capítulo III operando em um sistema com características mais reais do que o sistema em que estes foram modelados. Tal sistema foi modelado mediante parâmetros reais obtidos por medição. O sistema em questão é um alimentador da concessionária de energia elétrica ESPÍRITO SANTO CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. – ESCELSA.

Os parâmetros físicos do sistema foram fornecidos em um arquivo no formato .xls, contendo dados de barra, tais como: barra de início e término, tensão da barra, potência ativa, reativa e potência do compensador reativo, caso este exista. Além destas informações, o arquivo fornece os dados de linha como: a resistência e a reatância dos cabos por unidade de

comprimento e a corrente que flui pelo ramal em questão. Outro arquivo contendo os dados de medições no alimentador da subestação também foi fornecido.

Com as informações dos arquivos foi possível a realização da modelagem do sistema no programa ATP, possibilitando que os parâmetros desejados fossem concordantes com os dados constantes nos arquivos .xls fornecidos. O sistema é constituído por 191 barras de forma radial, nas tensões de 13,8kV (fase-fase) e 7,967kV (fase-neutro) e 33 bancos de capacitores para correção do fator de potência.

As informações de medição foram adquiridas no período entre os dias 23/09/2005 a 12/10/2005. Estes compreendem medições de tensão e corrente, na frequência fundamental e suas componentes harmônicas até a 11ª ordem.

Adicionalmente, o diagrama resultante do sistema em estudo poderá ser visto no ANEXO E, onde poderá ser identificada a numeração dos barramentos, as ramificações, as cargas e a alocação dos bancos de capacitores, em conjunto com o arquivo de modelagem do ATP.

O transformador da subestação é protegido por um relé de neutro 51N que, segundo informações técnicas fornecidas pela concessionária, está ajustado para uma corrente de 60A.

Tendo em vista atuações do referido relé, medidas corretivas e investigações eram necessárias. Assim, após algumas medições foi constatada a presença considerável de correntes harmônicas no barramento de saída do alimentador em questão, onde as medições foram feitas, com predominância da corrente de ordem três, cujo valor RMS era superior a 550% em relação à fundamental com magnitude da ordem de 15A.

Neste sentido, como resultados de medições realizadas no referido alimentador, a figura (4.1) mostra o espectro harmônico, em porcentagem, da corrente de linha e a figura (4.2) a distorção harmônica total de tensão de fase.

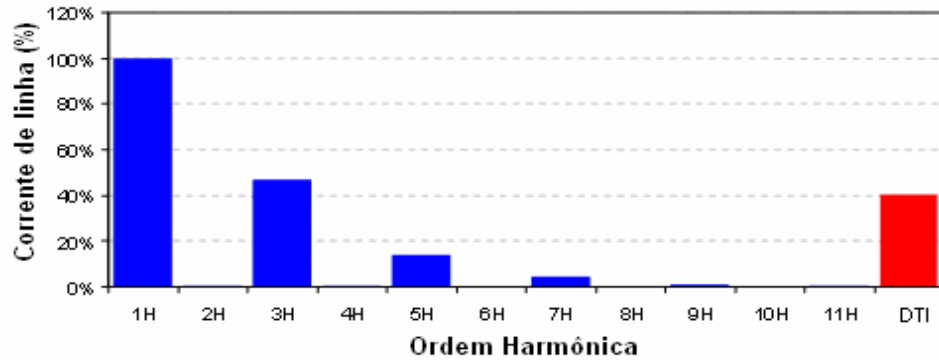


Figura 4.1 – Espectro harmônico da corrente de linha, obtido na medição.

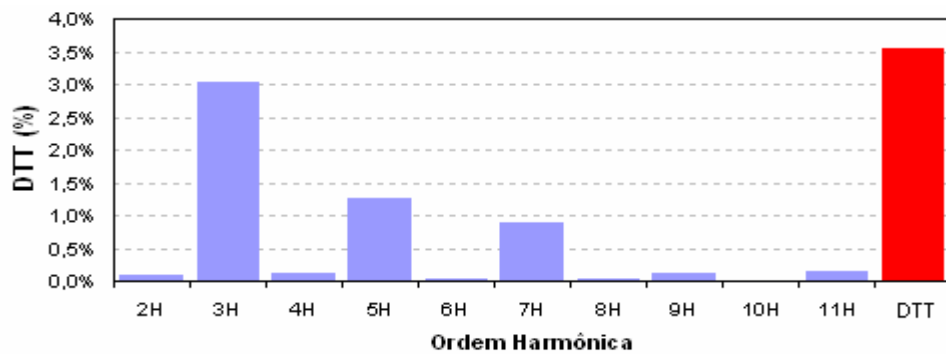


Figura 4.2 – Espectro harmônico da tensão de fase, obtido na medição.

Verifica-se nestas figuras, os conteúdos harmônicos existentes nas grandezas tensões de fase e correntes de linha, com predominância de harmônicas de ordem três. Prosseguindo, a figura (4.3) mostra o espectro harmônico, em porcentagem, da corrente que circula pelo neutro do transformador também obtido na medição, onde se observa novamente a predominância da harmônica de corrente de ordem três.

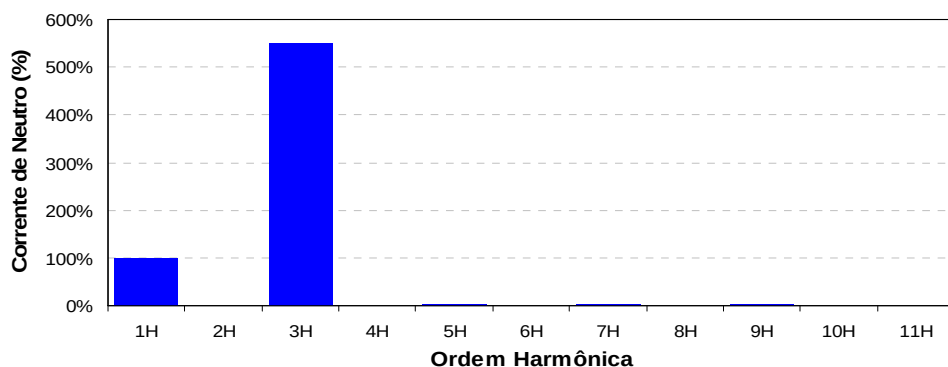


Figura 4.3 – Espectro harmônico da corrente no neutro do transformador da subestação.