

**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**

**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  
aprovada em \_\_/\_\_/07 pela Banca Examinadora:

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



# **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, Drº (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, 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.

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 sequência 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, sequência 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 not 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 transforming in the real substation.

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

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xiv</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>1</b>
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
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>9</b>
<b>CORRENTES HARMONICAS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA.....</b>	<b>9</b>
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.....	23
2.6 ESTADO DA ARTE.....	27
2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	34
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>36</b>
<b>MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DOS FILTROS</b>	
<b>DE CORRENTES DE SEQUÊNCIA ZERO EM SISTEMA TESTE.....</b>	<b>36</b>
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 Parametrização do banco de transformadores.....	47
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 Parametrização 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.....	53
3.2.3.1	Princípio operativo do filtro harmônico sintonizado em derivação.....	64
3.2.3.2	Parametrização 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	Parametrização 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	Parametrização do filtro em série no neutro.....	91
3.2.5.2	Comentários sobre o modelo.....	95
3.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	96
<b>CAPÍTULO IV.....</b>		<b>100</b>
<b>AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE FILTROS HARMÔNICOS PASSIVOS</b>		
<b>LC E ELETROMAGNÉTICOS NA MINIMIZAÇÃO DE CORRENTES DE</b>		
<b>SEQÜÊNCIA ZERO EM SISTEMAS AÉREOS DE DISTRIBUIÇÃO.....</b>		<b>100</b>
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.....	118
4.4	AVALIAÇÃO DO FILTRO TIPO 2.....	118
4.4.1	Comentários gerais.....	125
4.5	AVALIAÇÃO DO FILTRO TIPO 3.....	126
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.....	160
4.7.1	Comentários gerais.....	170
4.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	171
<b>CAPÍTULO V.....</b>		<b>176</b>
<b>CONCLUSÕES FINAIS.....</b>		<b>176</b>
<b>CAPÍTULO VI.....</b>		<b>182</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>182</b>
<b>ANEXO.....</b>		<b>192</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 –	Relação entre uma tensão aplicada a uma carga <b>versus</b> 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.....	23
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.....	43
Figura 3.7 –	Circuito equivalente de seqüência zero para o sistema da figura 3.6.....	44
Figura 3.8 –	Variação do parâmetro resistência dos enrolamentos do transformador em função de sua potência.....	48
Figura 3.9 –	Tensões de fase e correntes de linha do sistema teste antes da conexão do banco de transformadores.....	49
Figura 3.10 –	Corrente no neutro do sistema teste antes do acoplamento do banco de transformadores.....	50
Figura 3.11 –	Tensões de fase e correntes de linha do sistema teste após a conexão do banco de transformadores.....	51
Figura 3.12 –	Corrente eficaz no neutro antes e depois da conexão do transformador zig-zag em derivação com a carga.....	51
Figura 3.13 –	Espectro harmônico da corrente no condutor neutro do sistema antes e após o acoplamento do filtro.....	52
Figura 3.14 –	Espectro harmônico da corrente da fase A do sistema antes e após o acoplamento do filtro.....	52
Figura 3.15 –	Circuito equivalente do filtro LC série: Compensador bloqueador de harmônicos.....	55
Figura 3.16 –	Tensões de fase e correntes de linha do sistema teste antes da conexão do banco de transformadores.....	58
Figura 3.17 –	Correntes de linha e no neutro do sistema teste após o acoplamento do filtro.....	59
Figura 3.18 –	Espectro harmônico da corrente da fase A do sistema antes e após o acoplamento do filtro.....	60

Figura 3.19 –	Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após o acoplamento do filtro.....	60
Figura 3.20 –	Tensões de fase antes e após o acoplamento do filtro.....	61
Figura 3.21 –	Espectro harmônico da tensão de fase do sistema teste antes e após o acoplamento do filtro.....	61
Figura 3.22 –	Diagrama de um circuito RLC em série.....	64
Figura 3.23 –	Tensões de fase e correntes de linha antes do acoplamento do filtro.....	67
Figura 3.24 –	Espectro harmônico da corrente da fase A antes do acoplamento do filtro.....	67
Figura 3.25 –	Espectro harmônico da corrente circulante pelo neutro do sistema da figura 3.1.....	68
Figura 3.26 –	Variação do módulo e ângulo da impedância do filtro com a frequência.....	69
Figura 3.27 –	Diagrama resultante por fase do sistema com o filtro de correntes de terceira ordem.....	69
Figura 3.28 –	Tensões de fase e correntes de linha após o acoplamento do filtro.....	70
Figura 3.29 –	Espectro harmônico da corrente da fase A após o acoplamento do filtro.....	71
Figura 3.30 –	Espectro harmônico da corrente no neutro após o acoplamento do filtro.....	71
Figura 3.31 –	Corrente RMS no neutro do transformador sem e com o acoplamento do filtro em derivação para a terceira harmônica.....	72
Figura 3.32 –	Variação do módulo e ângulo da impedância do filtro com a frequência.....	73
Figura 3.33 –	Tensões de fase e correntes de linha do sistema após o acoplamento do Filtro.....	74
Figura 3.34 –	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 3.35 –	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 3.36 –	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 3.37 –	Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes do acoplamento dos filtros; com filtro de terceira ordem e com os filtros de terceira e quinta ordens.....	76
Figura 3.38 –	Diagrama resultante por fase do sistema com o filtro de correntes de terceira ordem.....	78
Figura 3.39 –	Variação do módulo e ângulo da impedância do filtro com a frequência.....	82
Figura 3.40 –	Tensões de fase antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 9ª ordens.....	83
Figura 3.41 –	Correntes de linha antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 9ª ordens.....	84
Figura 3.42 –	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 4.43 –	Espectro harmônico da tensão de fase do sistema antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª e 9ª ordem.....	85
Figura 3.44 –	Espectro harmônico da corrente de linha do sistema antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª e 9ª ordem.....	86
Figura 3.45 –	Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª e 9ª ordem.....	86
Figura 3.46 –	Tensões de fase do sistema teste antes e após o acoplamento dos filtros série e derivação.....	87
Figura 3.47 –	Correntes de linha do sistema teste antes e após o acoplamento dos filtros série e derivação.....	88

Figura 3.48 –	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 3.49 –	Espectro harmônico da tensão de fase do sistema antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª e 5ª ordens em derivação.....	89
Figura 3.50 –	Espectro harmônico da corrente de linha do sistema antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª e 5ª ordens em derivação.....	90
Figura 3.51 –	Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª e 5ª ordem.....	90
Figura 3.52 –	Diagrama resultante por fase do sistema com o filtro de correntes de terceira ordem.....	92
Figura 3.53 –	Tensões de fase do sistema teste antes e após o acoplamento do filtro série no neutro.....	93
Figura 3.54 –	Correntes de linha do sistema teste antes e após o acoplamento do filtro no neutro do sistema.....	93
Figura 3.55 –	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 3.56 –	Espectro harmônico da tensão de fase do sistema antes e após o acoplamento do filtro de 3ª ordem no neutro do sistema.....	94
Figura 3.57 –	Espectro harmônico da corrente de linha do sistema antes e após o acoplamento do filtro de 3ª ordem.....	95
Figura 3.58 –	Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após o acoplamento 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.....	104
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 do acoplamento do banco de transformadores.....	108
Figura 4.13 –	Espectro harmônico das tensões de fase no ponto de acoplamento dos filtros.....	109
Figura 4.14 –	Espectro harmônico das correntes de linha no ponto de acoplamento dos filtros.....	109
Figura 4.15 –	Tensões de fase do sistema antes e após do acoplamento do banco de transformadores.....	111
Figura 4.16 –	Espectro harmônico das tensões de fase no ponto de acoplamento sem e com o filtro eletromagnético.....	111
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 acoplamento dos filtros, antes e após a conexão do banco de transformadores.....	112
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.....	113
Figura 4.21 –	Corrente RMS no neutro do transformador do alimentador.....	114
Figura 4.22 –	Tensões de fase do sistema antes e após a conexão do banco de transformadores.....	115
Figura 4.23 –	Correntes de linha do sistema antes e após a conexão do banco de transformadores.....	115
Figura 4.24 –	Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de fase sem e com a presença do banco de transformadores.....	116
Figura 4.25 –	Comparação entre os espectros harmônicos das correntes de linha sem e com a presença do banco de transformadores.....	116
Figura 4.26 –	Tensões de fase do sistema antes e após a conexão dos filtros em série sintonizados na frequência fundamental.....	119
Figura 4.27 –	Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de fase sem e com a presença dos filtros em série.....	120
Figura 4.28 –	Correntes de linha antes e após o acoplamento dos filtros em série.....	120
Figura 4.29 –	Espectro harmônico das correntes de linha no ponto de acoplamento dos filtros, antes e após a conexão dos filtros em série.....	121
Figura 4.30 –	Espectro harmônico das correntes de neutro do sistema antes e após o acoplamento dos filtros em série.....	121
Figura 4.31 –	Corrente RMS no neutro do transformador do alimentador.....	122
Figura 4.32 –	Tensões de fase do sistema antes e após a conexão dos filtros.....	123
Figura 4.33 –	Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de fase na saída do alimentador sem e com a presença dos filtros.....	123
Figura 4.34 –	Comparação entre os espectros harmônicos das correntes de linha na saída do alimentador sem e com a presença dos filtros.....	124
Figura 4.35 –	Comparação entre os espectros harmônicos das correntes de linha na saída do alimentador sem e com a presença dos filtros.....	124
Figura 4.36 –	Tensões de fase do sistema antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª ordem.....	129
Figura 4.37 –	Tensões de fase do sistema antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens.....	129
Figura 4.38 –	Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de fase sem e com a presença dos filtros de 3ª ordem.....	130
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.....	130
Figura 4.40 –	Variação da impedância dos filtros com a frequência.....	131
Figura 4.41 –	Correntes de linha antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª ordem.....	132
Figura 4.42 –	Correntes de linha antes e após a conexão dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens.....	133
Figura 4.43 –	Espectro harmônico das correntes de linha no ponto de acoplamento dos filtros, antes e após a conexão dos filtros de 3ª ordem.....	134
Figura 4.44 –	Espectro harmônico das correntes de linha no ponto de acoplamento dos filtros, antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens.....	134
Figura 4.45 –	Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens.....	135

Figura 4.46 –	Corrente RMS no neutro do transformador do alimentador.....	135
Figura 4.47 –	Tensões de fase do sistema antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª ordem.....	137
Figura 4.48 –	Correntes de linha do sistema antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª ordem.....	137
Figura 4.49 –	Tensões de fase do sistema antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens.....	138
Figura 4.50 –	Correntes de linha do sistema antes e após do acoplamento dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens.....	138
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.....	139
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 do acoplamento 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 acoplamento dos filtros, antes do filtro (lado do sistema) e após o filtro (lado da carga).....	145
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.....	146
Figura 4.59 –	Espectro harmônico das correntes de linha antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 9ª ordens, em série.....	147
Figura 4.60 –	Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após o acoplamento 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.....	148
Figura 4.62 –	Tensões de fase antese após do acoplamento dos filtros de 3ª e 9ª ordens na saída do alimentador.....	149
Figura 4.63 –	Correntes de linha antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª e 9ª ordens, na saída do alimentador.....	150
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.....	150
Figura 4.65 –	Tensões de fase no ponto de acoplamento dos filtros, no lado do sistema, com os filtros série e antes e após o acoplamento dos filtros em derivação.....	152
Figura 4.66 –	Correntes de linha no ponto de acoplamento dos filtros, no lado do sistema, com os filtros série e antes do acoplamento dos filtros em derivação.....	152
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 acoplamento dos filtros, no lado do sistema.....	153
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 acoplamento dos filtros, no lado da carga.....	153
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 acoplamento dos filtros, no lado do sistema.....	154



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 acoplamento dos filtros, no lado da carga.....	155
Figura 4.71 –	Tensões de fase na saída do alimentador com os filtros série e antes do acoplamento dos filtros em derivação.....	155
Figura 4.72 –	Correntes de linha na saída do alimentador, com os filtros série e antes do acoplamento dos filtros em derivação.....	156
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.....	157
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.....	157
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.....	158
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.....	158
Figura 4.77 –	Tensões de fase antes e após o acoplamento do filtro de 3ª ordem em série, no ponto de acoplamento dos filtros.....	162
Figura 4.78 –	Espectro harmônico das tensões de fase no ponto de acoplamento dos filtros, antes e após a conexão dos filtros.....	163
Figura 4.79 –	Interação da impedância harmônica do filtro de 3ª ordem em série com o sistema devido a variação da frequência.....	163
Figura 4.80 –	Correntes de linha sem e com o filtro de 3ª ordem, no ponto de acoplamento dos filtros.....	164
Figura 4.81 –	Espectro harmônico das correntes de linha antes e após o acoplamento do filtro de 3ª ordem, em série, no ponto de acoplamento dos filtros.....	165
Figura 4.82 –	Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após a conexão do filtro de 3ª ordem.....	165
Figura 4.83 –	Corrente RMS no neutro do transformador do alimentador sem e com o filtro de 3ª ordem.....	166
Figura 4.84 –	Tensões de fase antes e após a conexão do filtro de 3ª ordem, na saída do alimentador.....	167
Figura 4.85 –	Correntes de linha antes e após a conexão do filtro de 3ª ordem, na saída do alimentador.....	168
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.....	168

## 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 acoplamento dos filtros sem a presença dos filtros.....	107
Tabela 4.2 –	Parâmetros dos transformadores do filtro tipo 1.....	110
Tabela 4.3 –	Fator de potência, por fase, no ponto de acoplamento dos filtros após a conexão do banco de transformadores.....	114
Tabela 4.4 –	Variação do fator de potência, por fase.....	117
Tabela 4.5 –	Variação da distorção harmônica total de tensão e corrente.....	117
Tabela 4.6 –	Elementos RLC do filtro utilizados na modelagem dos filtros em série.....	119
Tabela 4.7 –	Fator de potência, por fase, no ponto de acoplamento dos filtros antes e após conexão dos filtros.....	122
Tabela 4.8 –	Variação do fator de potência, por fase.....	125
Tabela 4.9 –	Variação da distorção harmônica total de tensão e corrente, por fase.....	125
Tabela 4.10 –	Limites de distorção harmônica de tensão, em porcentagem, em relação à tensão à frequência fundamental.....	127
Tabela 4.11 –	Limites de distorção harmônica de corrente ( $I_h$ ) em porcentagem de $I_L$ .....	127
Tabela 4.12 –	Resumo dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens modelados.....	128
Tabela 4.13 –	Fator de potência, por fase, no ponto de acoplamento dos filtros após o acoplamento dos filtros de 3ª ordem.....	136
Tabela 4.14 –	Variação do fator de potência, por fase.....	140
Tabela 4.15 –	Variação da distorção harmônica total de tensão e corrente, por fase.....	141
Tabela 4.16 –	Resumo dos filtros de 3ª, 9ª série modelados.....	143
Tabela 4.17 –	Fator de potência, por fase, no ponto de acoplamento dos filtros após o acoplamento dos filtros de 3ª e 9ª ordens.....	148
Tabela 4.18 –	Resumo dos filtros de 3ª, 9ª série e 3ª e 5ª ordens derivação modelados.....	151
Tabela 4.19 –	Variação do fator de potência, por fase.....	159
Tabela 4.20 –	Variação da distorção harmônica total de tensão e corrente, por fase.....	159
Tabela 4.21 –	Resumo dos filtros de 3ª ordem em série harmônica modelados.....	161
Tabela 4.22 –	Fator de potência, por fase, no ponto de acoplamento dos filtros após o acoplamento do filtro de 3ª ordem.....	166
Tabela 4.23 –	Variação do fator de potência, por fase.....	169

Tabela 4.24 –	Variação da distorção harmônica total de tensão e corrente, por fase.....	<b>169</b>
Tabela 4.25 –	Quadro resumo dos tipos de filtros considerados e resultados obtidos com a simulação.....	<b>173</b>



# 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 a equipamentos gerados 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 a análise do problema das distorções harmônicas e como solucioná-los. 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 e simulação em condições ideais e acopladas a um sistema complexo, não ideal.
- 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, já que os problemas de distorção harmônica são classificados como problemas em regime permanente.

### 1.3 - RELEVÂNCIA

Pode-se dizer que os problemas gerados 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 relevante 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 acima, 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.

A modelagem do sistema teste, utilizado no capítulo III e a carga utilizada nessa etapa do trabalho foi realizada 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 acoplamento 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 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, de forma superficial, também foram contemplados nesta etapa dos trabalhos, juntamente com a particularidade das correntes de sequência zero. Finalmente, o estado da arte em dispositivos de filtragem harmônica foi considerado nesse capítulo.

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

Este capítulo objetivou a modelagem e 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 sequência 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.

## **Capítulo VI – Referências bibliográficas.**

## **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 gerando 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 a 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 à 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 a eletrônica de potência. Neste aspecto, como ilustração, a figura (2.1) ilustra a relação entre tensão *versus* corrente de cargas lineares e não lineares.

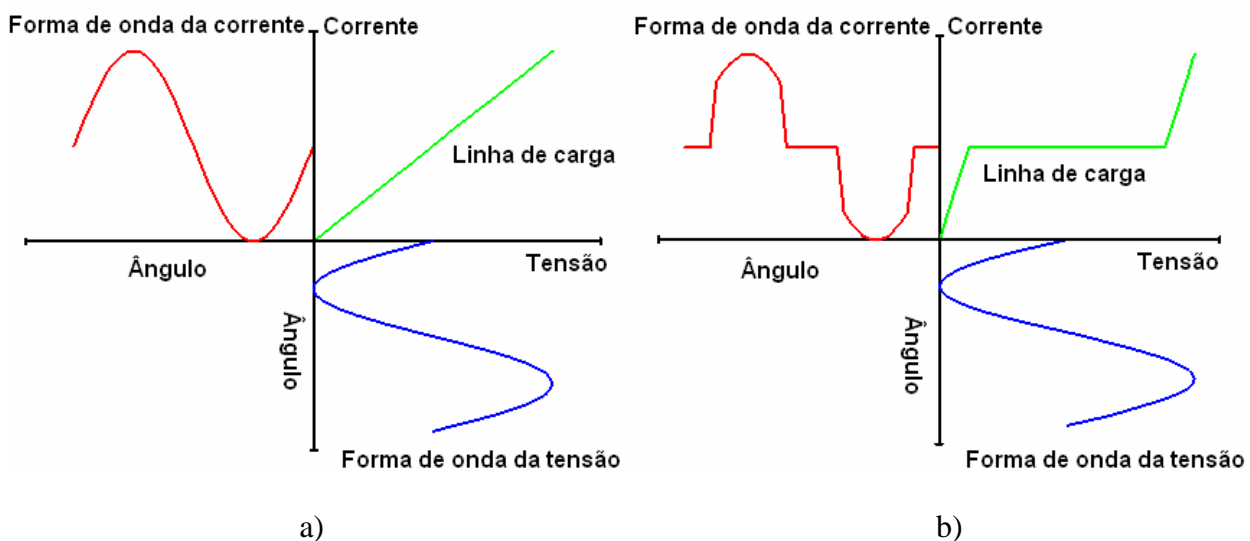


Figura 2.1 – Relação entre uma tensão aplicada a uma carga *versus* sua corrente de carga: a) Carga linear; b) Carga não linear.

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 compõem 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.

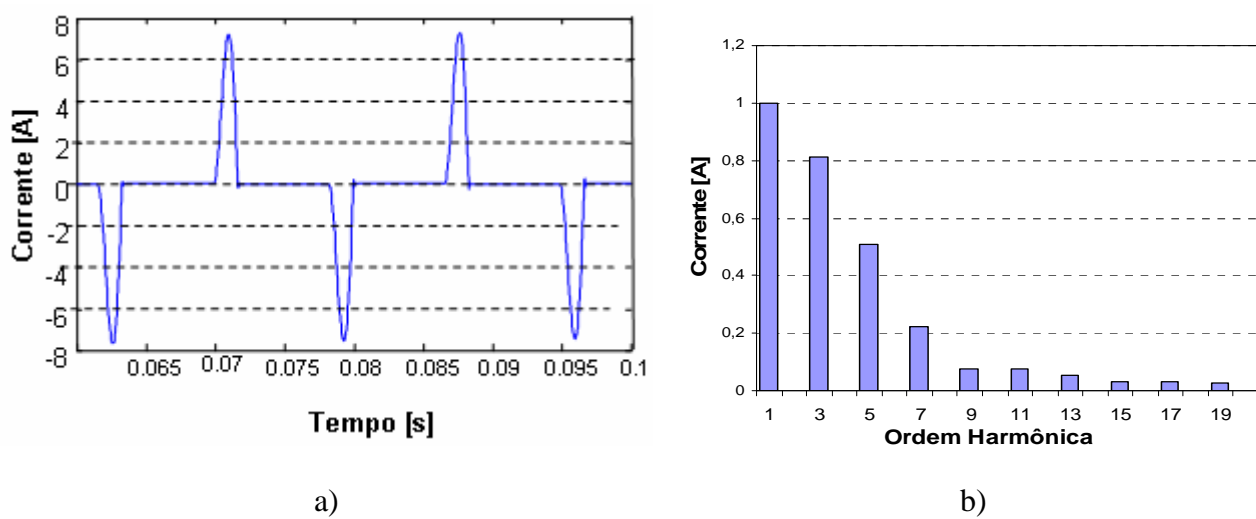


Figura 2.2 – Corrente típica de um retificador monofásico: a) Corrente de fase; b) Espectro harmônico correspondente.

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:

$$DTT = \sqrt{\frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} V_h^2}{V_1^2}} \times 100(\%) \quad (2.1)$$



$$DTI = \sqrt{\frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2}{I_1^2}} \times 100(\%) \quad (2.2)$$

Onde:

$DTT$  = Distorção harmônica percentual total de tensão;

$DTI$  = Distorção harmônica percentual total de corrente;

$V_h$  = 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.

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  $h$ ;

$DII_h$  = Distorção harmônica individual de corrente de ordem h

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 acima, 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. O fato é, com o avanço tecnológico, a facilidade do acesso aos equipamentos acima 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, consequentemente, 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.

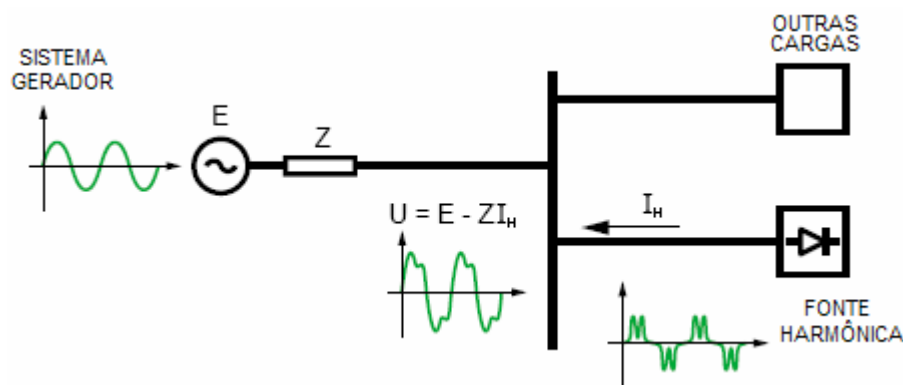


Figura 2.3 – Fluxo convencional de correntes harmônicas no sistema de potência

Portanto, como se pode observar, em se tratando de problemas com harmônicos, não existem ainda conceitos totalmente fundamentados e, consequentemente, discussões sobre o assunto ainda tomam corpo. 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 à torques oscilatórios, de relés, etc.

Considerando a classificação acima e o comportamento físico de alguns dispositivos constituintes do sistema elétrico frente a condições não lineares de operação, tanto de tensão quanto de corrente será discutido, a seguir, os efeitos mais importantes das distorções harmônicas em alguns 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 dois 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;

$\theta$  – 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 transformar em função do aumento adicional de temperatura, de acordo com a equação (2.5) [7]. Para tanto, considerou-se a variação da equação (2.5) extraída da NBR 5416:

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

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	51.363	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 parâmetros, 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 50/51N 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 a 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 resistência de  $14,8\Omega$  e uma indutância de  $0,1\text{ H}$ .

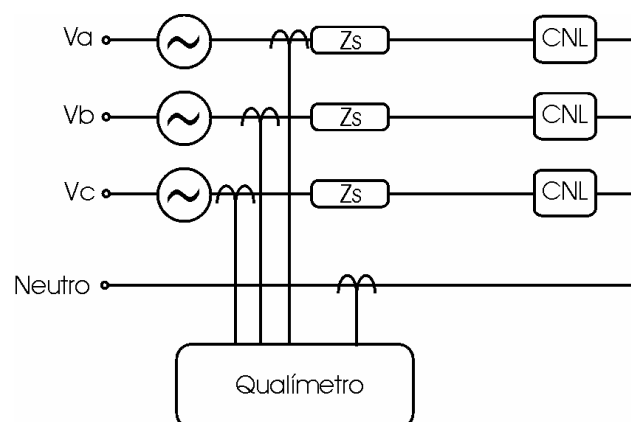


Figura 2.4 – Sistema teste simulado para medição da corrente no condutor neutro.

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.

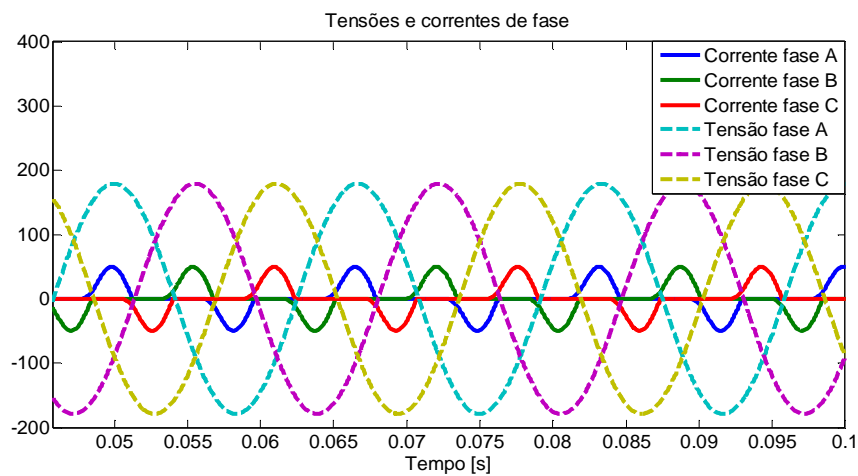


Figura 2.5 – Tensões e correntes de fase do sistema da figura 2.4.

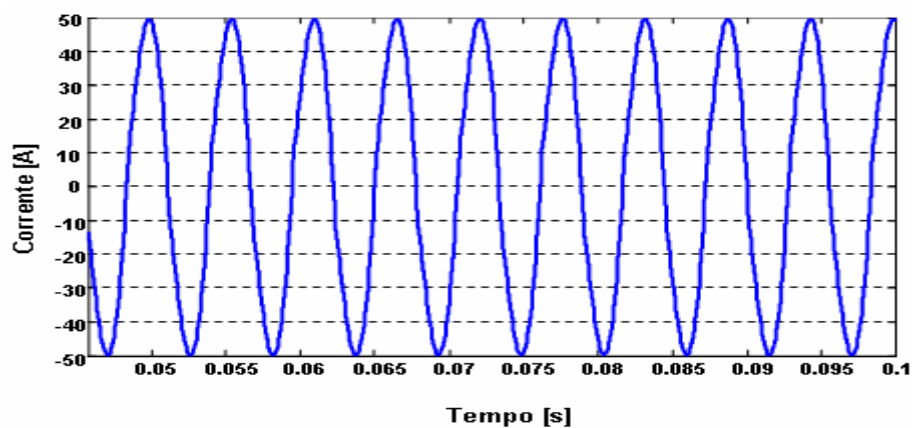


Figura 2.6 – Corrente no condutor neutro do sistema da figura 2.4.

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 sequência zero no condutor neutro, e também individualmente as correntes nas fases A, B e C.

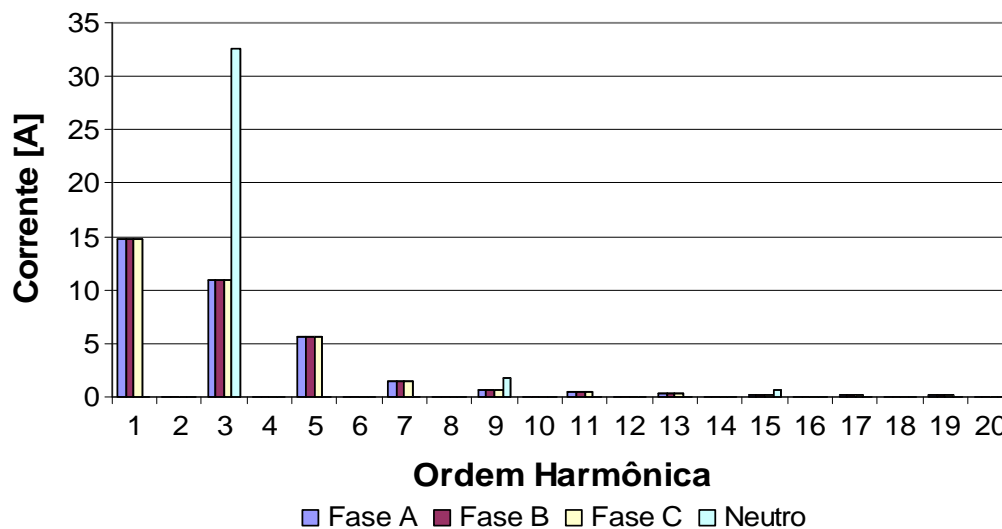


Figura 2.7 – Espectro harmônico das correntes de fase e de neutro.

Para um sistema trifásico, simétrico e equilibrado, a corrente existente no condutor neutro deveria ser zero, com isso a secção 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 sequência 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 sequência múltiplas de três, há de se reconhecer que as demais frequências podem também produzir componentes de sequência com características da sequência zero aqui considerada.

Caso isto aconteça, o fenômeno da circulação de correntes harmônicas pelo neutro fica fortalecido, sem contar ainda com a frequência fundamental que também poderá existir.

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

## **2.6 – ESTADO DA ARTE**

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

- 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;
- 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.

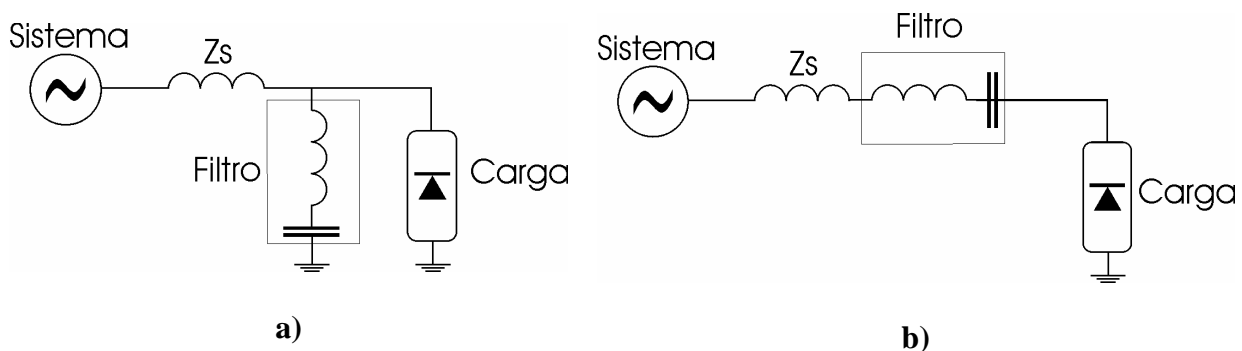


Figura 2.8 – Figura 2.8a) Filtro passivo em derivação com a carga. Figura 2.8b) Filtro passivo em série com a carga.

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 àsquelas 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 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).

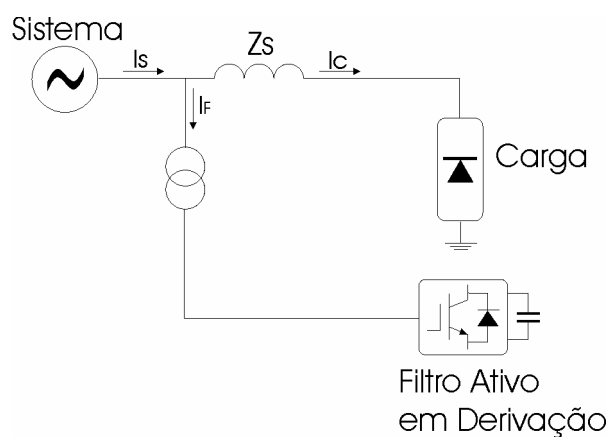


Figura 2.9 – Filtro ativo em derivação com a carga

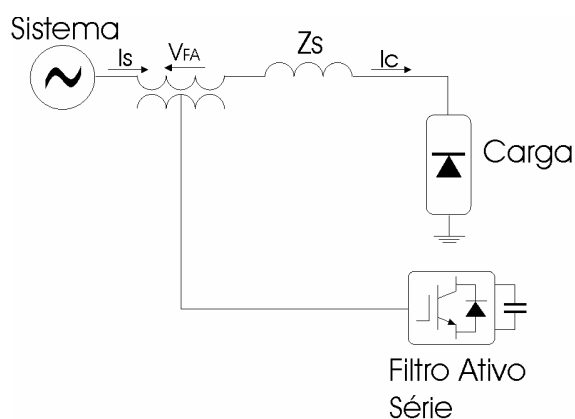


Figura 2.10 – Filtro ativo em série com a carga

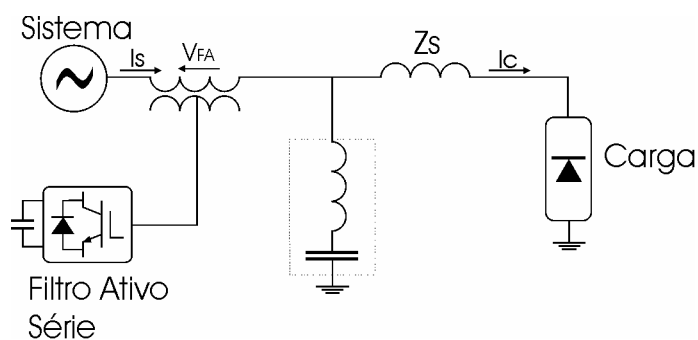


Figura 2.11 – Filtro ativo composto (híbrido).

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 [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 questão, que consiste em uma estrutura magnética em série com a carga não linear, mas à montante do filtro em derivação, chamado de bloqueador de seqüência zero. Este dispositivo 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 distorcida. 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.

A figura (2.12) mostra, respectivamente, o bloqueador eletromagnético de seqüência zero e o transformador passante (como caminho de baixa impedância para a corrente de seqüência zero). Estas duas estruturas são bastante citadas pelas referências utilizadas nesta dissertação.

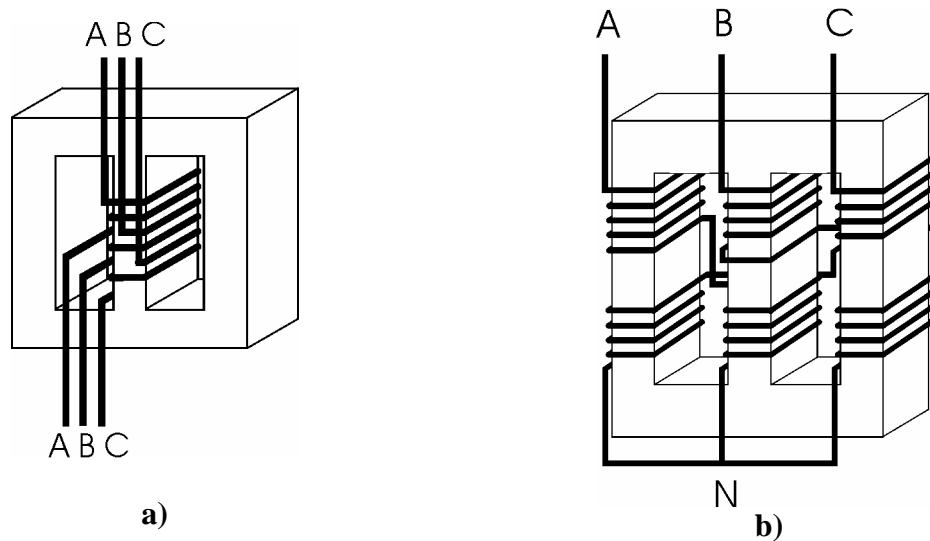


Figura 2.12 – Estruturas magnéticas utilizadas como filtros de seqüência zero. a) bloqueador eletromagnético de seqüência zero; b) transformador passante de correntes de seqüência zero.

## 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. Um breve comentário sobre como os principais equipamentos presentes no sistema elétrico são afetados pela presença de tensões e/ou correntes harmônicas também foi aqui considerado. Uma introdução, apesar de

sucinta, mas consistente o bastante para que fossem feitas considerações acerca das particularidades das correntes de sequência 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. À 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 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, 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.

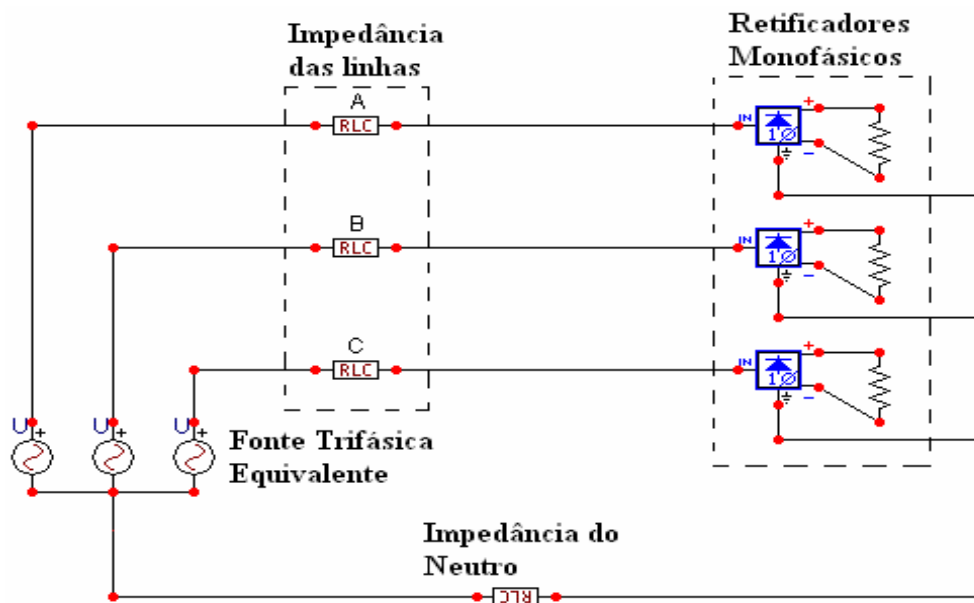
O programa contém uma vasta biblioteca com modelos variados, tais como: resistores, indutores, capacitores, transformadores lineares ou não, chaves, fontes, etc. Por haver vários grupos de estudo internacionais desenvolvendo trabalhos no *ATP*, uma vasta bibliografia pode ser encontrada sobre o assunto [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 ao qual 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 sequência 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, impedâncias representando as impedâncias das linhas, retificadores monofásicos alimentando uma impedância, de forma a representar as cargas não lineares. Este arranjo está mostrado na figura (3.1) abaixo.



*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).

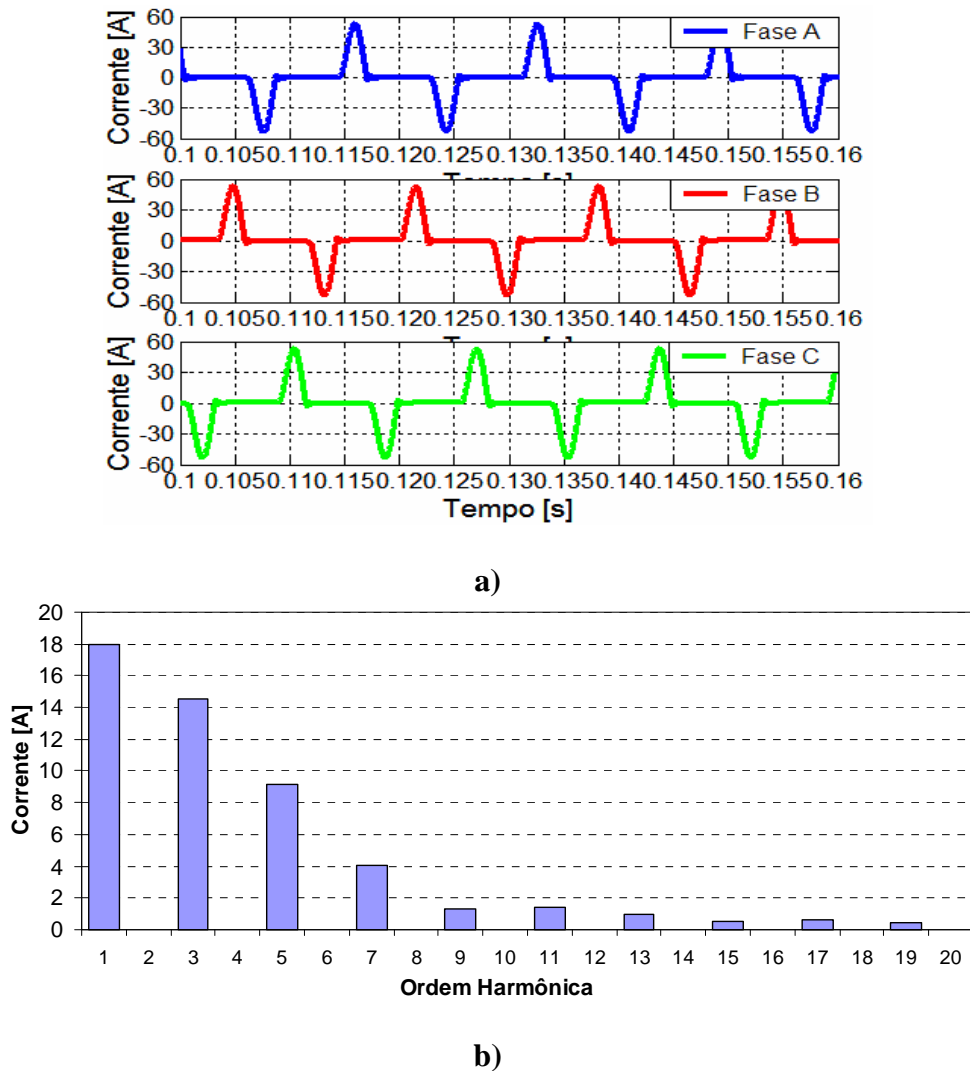


Figura 3.2 – a) Correntes de linha do sistema teste da figura 3.1; b) Espectro harmônico da corrente de linha A.

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 de encontro com o 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.

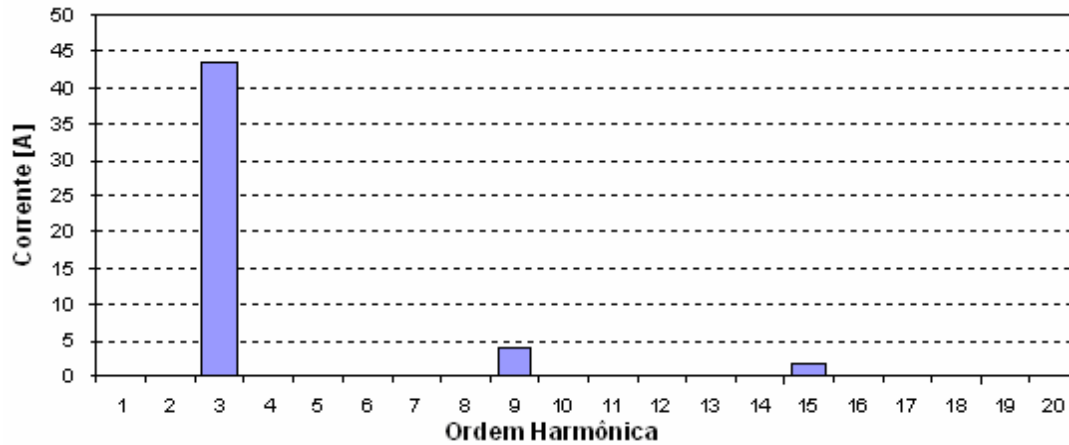


Figura 3.3 – Espectro harmônico da corrente no neutro do sistema da figura 3.1.

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).

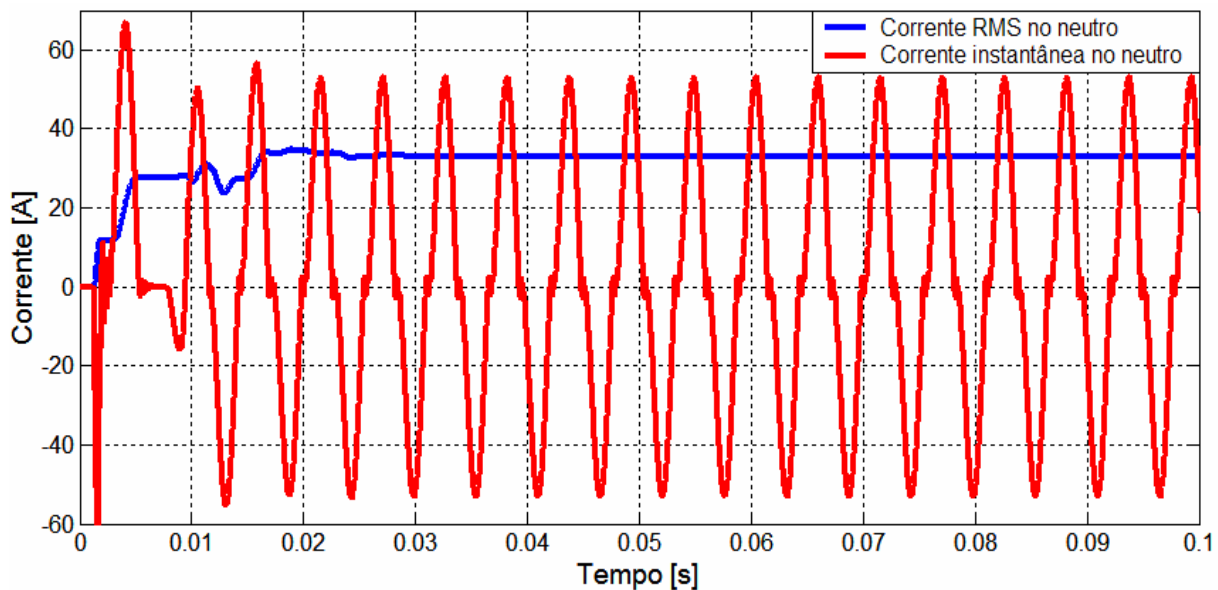


Figura 3.4 – Corrente instantânea no condutor neutro versus corrente eficaz (RMS)

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 sequência 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 no título acima 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 ( $Y/\Delta$ ) 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 referida tabela é reproduzida na tabela (3.1).

---

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

---

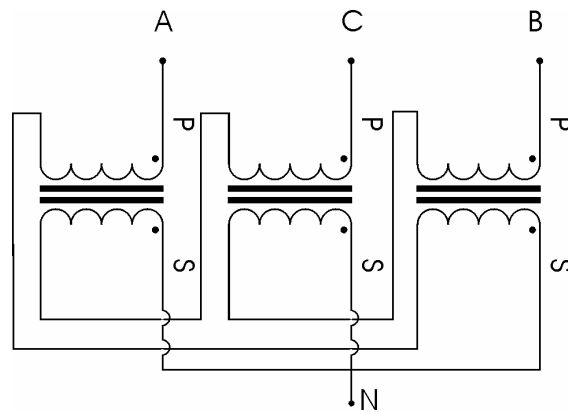
Conexão	Zig-Zag	$Y/\Delta$	T
(kVA)	$0,666 \times V_L I_{NC}$	$1,155 \times V_L I_{NC}$	$0,718 \times V_L I_{NC}$

---

Na tabela (3.1)  $V_L$  e  $I_{NC}$  são, respectivamente, a tensão de linha e a corrente de fase compensada. Esta característica possibilita que o transformador em zig-zag seja o mais utilizado 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) abaixo.



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

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

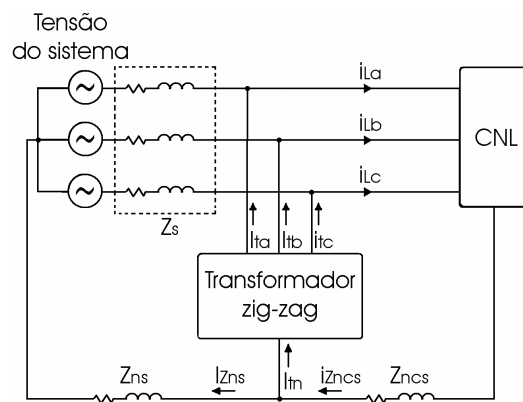
$i_{c0}(t)$  : corrente de seqüência zero na fase C

A corrente resultante que circula pelo condutor neutro é, portanto a soma das correntes de sequência 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, significando que a corrente que circula nos enrolamentos primários são iguais às correntes que circulam nos enrolamentos secundários. Na figura (3.2a) verifica-se que a corrente que circula na fase A será igual a corrente que circula na fase B, que por sua vez será igual a corrente que circula na fase C, o que significa que a corrente que flui pelo transformador tem mesmo valor nas três fases, isso significa que o transformador zig-zag pode fornecer um caminho de baixa impedância para correntes de sequência zero.

Objetivando mostrar a configuração desta primeira estrutura de filtragem e o comportamento da componente da corrente de sequência 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;

$Z_s$ : impedância do sistema alimentador;

$Z_{ns}$ : impedância do condutor neutro entre o neutro do transformador e o neutro do alimentador;

$Z_{ncs}$ : impedância do condutor neutro entre o neutro da carga e o neutro do transformador;

$i_L^a, i_L^b, i_L^c$ : 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).

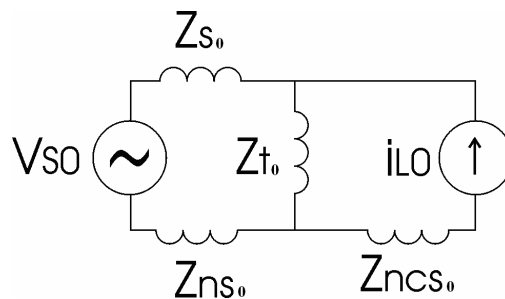


Figura 3.7 – Circuito equivalente de seqüência zero para o sistema da figura 3.6.



Onde;

$V_{s0}$  : Tensão de seqüência zero gerada pela fonte;

$I_{s0}$  : 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;

$Z_{ncso}$  : 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, que tem a função de simbolizar as correntes de seqüência zero que são injetadas pela carga no sistema. Assim, é possível discretizar 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 discretizada, 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. Considerando, à 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);

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

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 parcela correspondente à impedância do sistema,  $Z_{s0}$ , e à impedância do condutor neutro,  $Z_{ns0}$ .

### **3.2.1.2 – PARAMETRIZAÇÃO 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 conseqüentemente 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 desta dissertação.

A figura (3.8) mostra um gráfico da variação da resistência dos enrolamentos do transformador em função de sua potência.

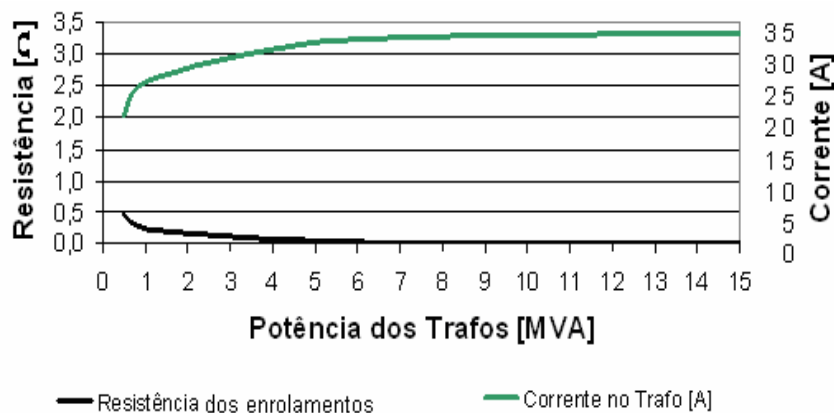
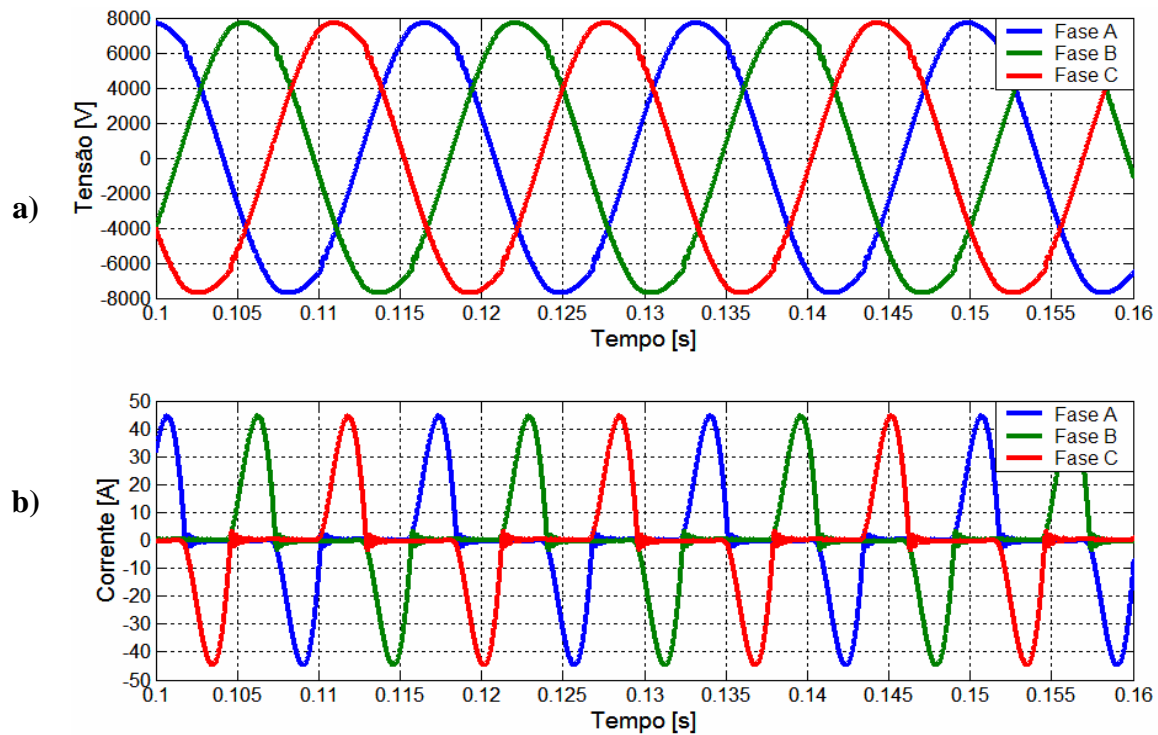


Figura 3.8 – Variação do parâmetro resistência dos enrolamentos do transformador em função de sua potência.

Adicionalmente, na figura (3.9a) e (3.9b) são mostradas, respectivamente, as tensões de fase e as correntes de linha do sistema antes da inserção do referido banco de transformadores. A figura (3.10) complementarmente mostra a corrente eficaz que circula pelo condutor neutro da instalação.



*Figura 3.9 – 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 claramente observado na figura (3.10), em comparação com a figura (3.9), a corrente que circula pelo condutor neutro é predominantemente constituída por corrente de ordem três. Tal comparação se faz observando-se os picos de correntes, nas correntes de linha, e pela característica das cargas monofásicas (retificadores monofásicos), que, intrinsecamente geram correntes harmônicas de ordem ímpar.

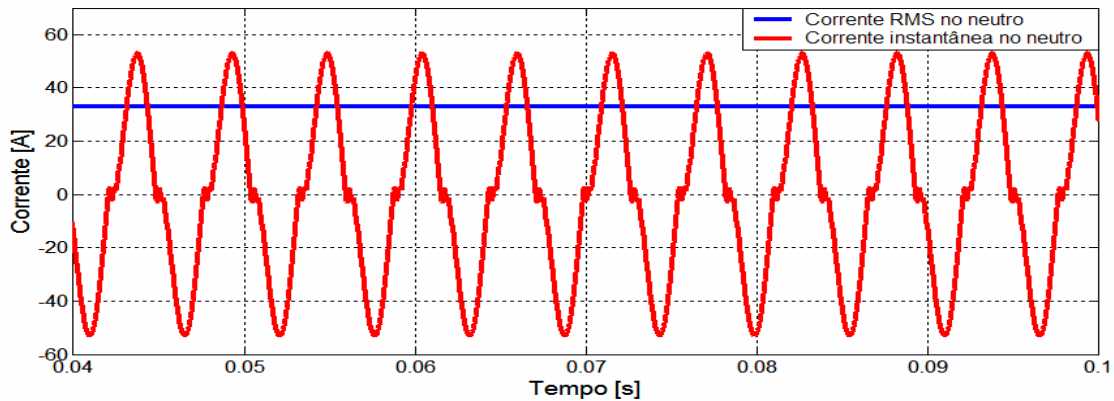


Figura 3.10 – Corrente no neutro do sistema teste antes do acoplamento do banco de transformadores.

A tabela (3.2) mostra os valores utilizados na modelagem dos transformadores em zig-zag.

Tabela 3.2 – Parâmetros dos transformadores do filtro tipo 1.

Resistência de Magnetização ( $\Omega$ )	317400
Resistência do Enrolamento Primário ( $\Omega$ )	0,08
Resistência do Enrolamento Secundário ( $\Omega$ )	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 sequência zero nas correntes de linha, o que significa uma forma de onda mais próxima de uma senóide, em comparação com as correntes da figura (3.9b). A figura (3.11) 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 (3.10), como pode ser visto na figura (3.12), 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 (3.13) mostra uma comparação entre a decomposição harmônica da corrente de neutro antes e após a conexão do banco de transformadores.

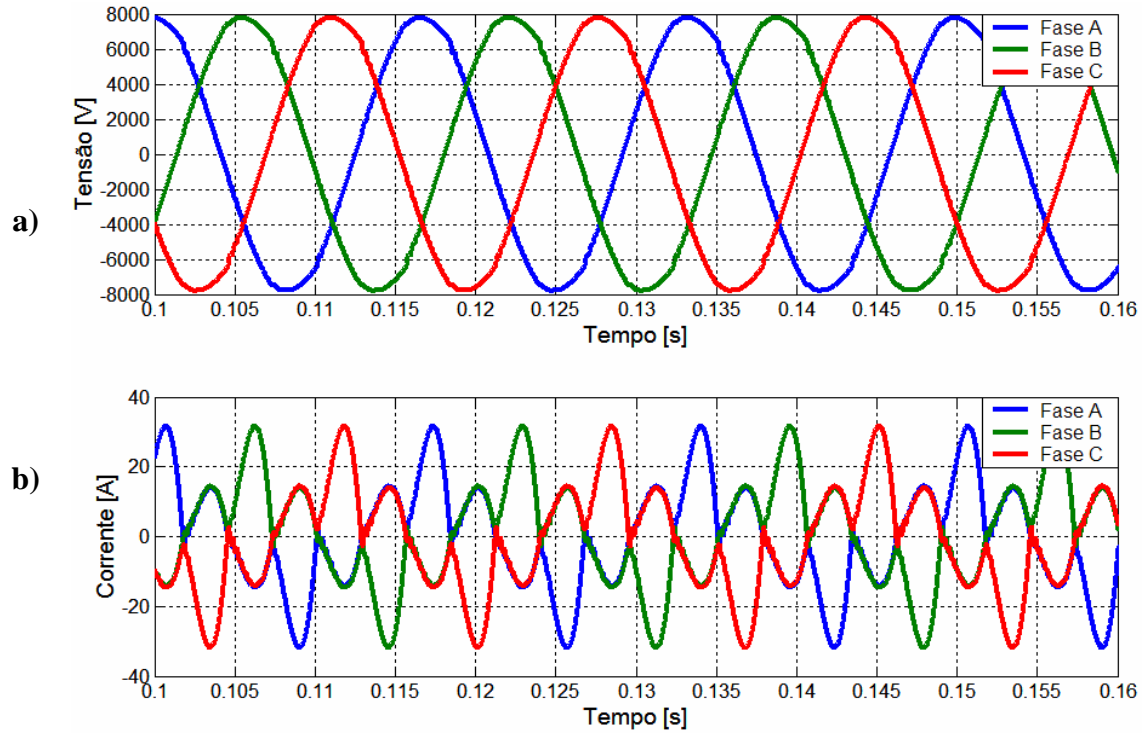


Figura 3.11 –a) Tensões de fase do sistema teste após a conexão do banco de transformadores. b) Correntes de linha do sistema teste após a conexão do banco de transformadores.

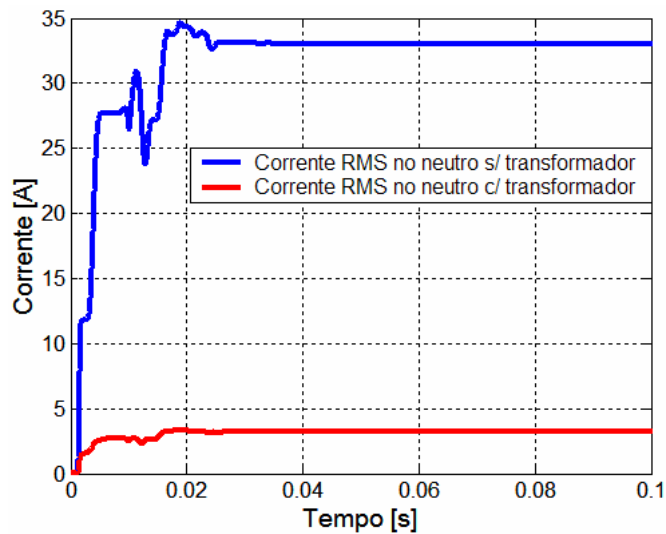


Figura 3.12 – Corrente eficaz no neutro antes e depois da conexão do transformador zig-zag em derivação com a carga.

A figura (3.14) 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.

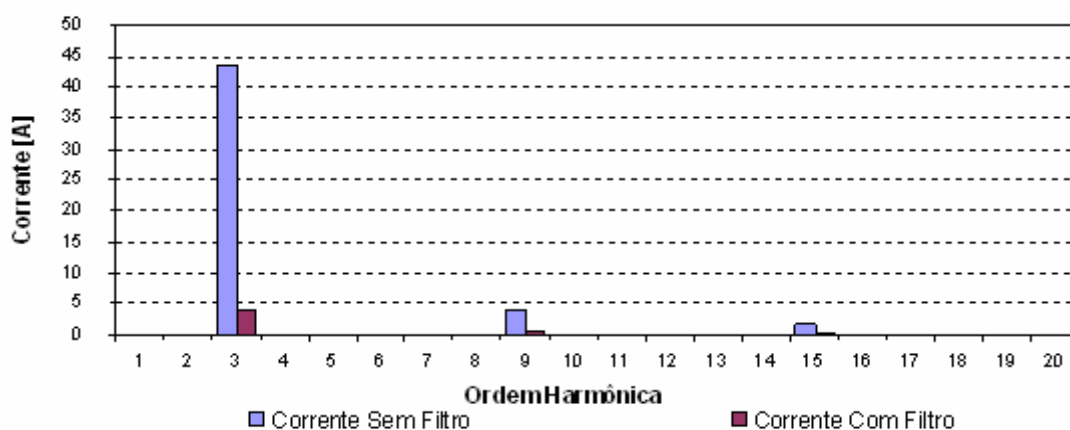


Figura 3.13 – Espectro harmônico da corrente no condutor neutro do sistema antes e após o acoplamento do filtro.

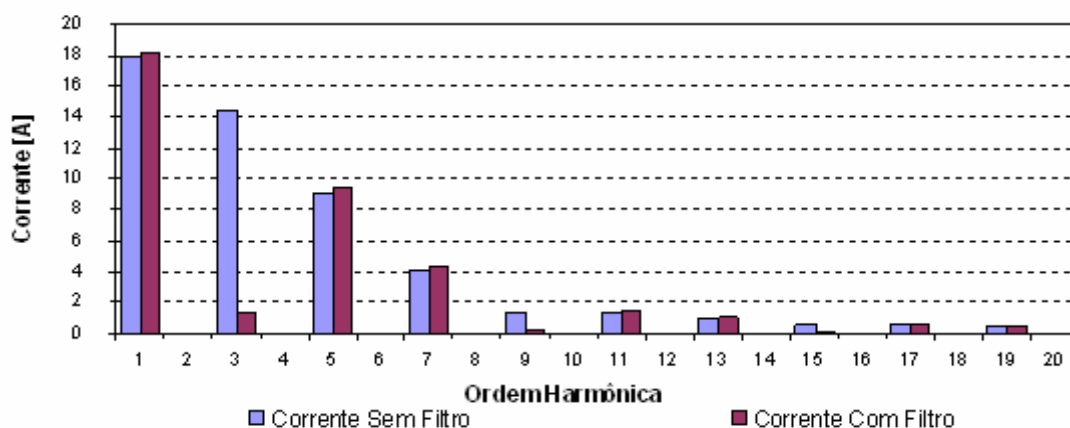


Figura 3.14 – Espectro harmônico da corrente da fase A do sistema antes e após o acoplamento do filtro.

Da figura (3.14) 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 (3.13) e (3.14) 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						
	1 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	11 <sup>a</sup>	13 <sup>a</sup>
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 do 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 ótimo de operação. É óbvio que este ponto ótimo, em se tratando de um sistema real, deve ser obtido pela consideração de, inclusive, outros parâmetros, que não foram até 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**

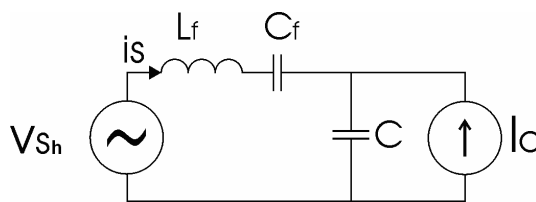
A estrutura do filtro tipo 2 de que se trata esta sub-seção é composta por componentes LC sintonizados na frequência fundamental e em série com a linha. Esse tipo de filtro também é conhecido como compensador bloqueador de harmônicos (*harmonic blocking compensator*) [12]. Portanto, a principal função da estrutura tipo 2 é proporcionar uma a impedância da linha elevada para as correntes harmônicas acima da 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. Assim a apresentação esquemática da estrutura deste tipo de filtro é apresentada na figura (3.15) a seguir.

#### **3.2.2.1 – PRINCÍPIO OPERATIVO DO COMPENSADOR BLOQUEADOR DE HARMÔNICOS**

Objetivando reduzir o efeito da baixa impedância do sistema no desempenho de filtros harmônicos ressonantes paralelos, um indutor em série 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 passar 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.

A conexão de um filtro sintonizado na frequência fundamental, inserido em série com a linha, ao invés de um indutor, 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. Em vistas da diminuição do fluxo de correntes harmônicas, sendo este substituído por um capacitor, isto é, se houver a necessidade da correção de fator de potência e de prover um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas injetadas pela carga. O circuito equivalente do filtro é mostrado na figura (3.15).



*Figura 3.15 – Circuito equivalente do filtro LC série: Compensador bloqueador de harmônicos.*

Onde:

$V_{sh}$  : 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 do sistema é usualmente muito menor do que a indutância equivalente do filtro, aquela pode ser desprezada para o cálculo da frequência de ressonância,  $\omega_f$ , ou seja [12].

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

Onde:

$\omega_f$  : frequência de ressonância do filtro;

$\omega_l$  : frequência fundamental do sistema;

A frequência de ressonância do filtro é calculada de tal forma que seja o 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 – PARAMETRIZAÇÃO DO FILTRO EM SÉRIE (tipo 2)**

A primeira etapa para a determinação dos parâmetros  $L_f$  e  $C_f$  dos elementos do filtro foi a identificação dos valores de tensão e corrente do sistema para o dimensionamento do capacitor para a correção do fator de potência, cujo valor é dado na equação (3.10).

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

Onde:

$C$  : capacitância para correção do fator de potência;

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

$\omega_1$  : frequência angular na frequência fundamental;

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

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

Assim, de posse do valor da capacitância necessária para a correção do fator de potência, por meio da equação (3.9) foi determinado o valor da capacitância  $C_f$  do filtro. Observou-se pelos resultados das simulações que, após o acoplamento do arranjo em série, o fator de potência foi melhorado, o que significa que o capacitor em derivação pode apresentar valor reduzido em comparação ao valor calculado pela equação (3.10). 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 (3.16) mostra as formas de onda da tensão de fase e da corrente de linha do sistema antes do acoplamento da estrutura proposta neste item.

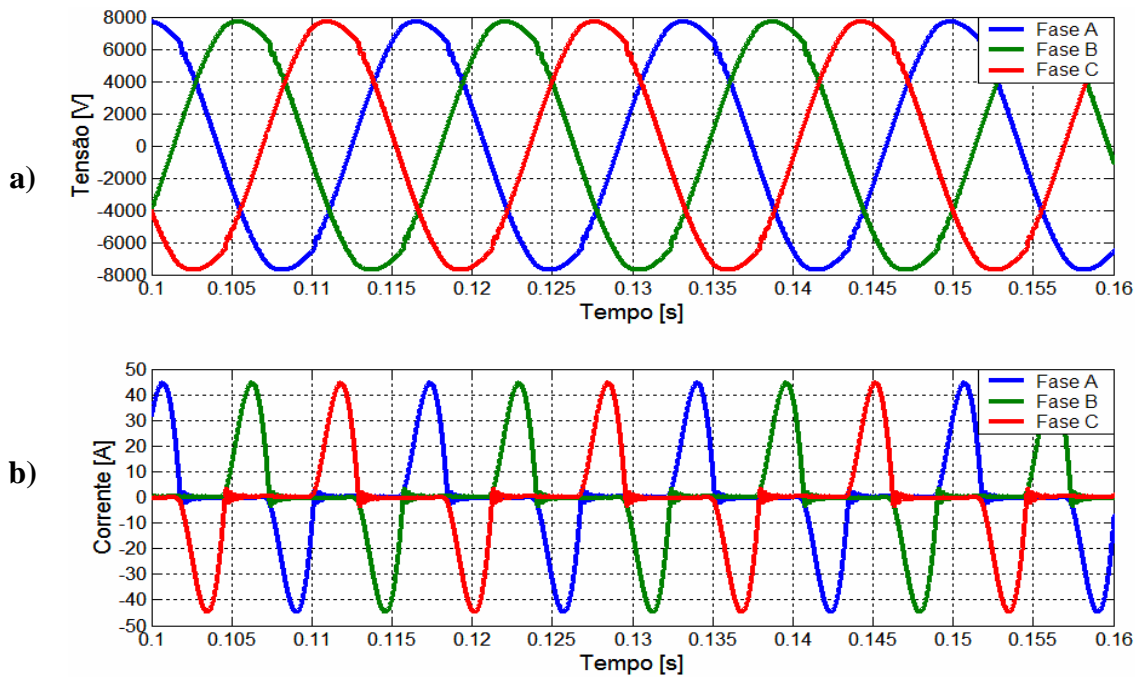


Figura 3.16 – a) Tensões de fase do sistema teste antes do acoplamento do filtro. b) Correntes de linha do sistema teste antes do acoplamento do filtro.

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 ( $\mu$ F)	0,819
Resistência $\Omega$	0,2
Fator de qualidade (Q)	60

Após o acoplamento 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 (3.17) mostra os resultados para as correntes de linha e as correntes no neutro após o acoplamento do filtro no sistema.

Com o objetivo de quantificar a corrente de neutro através de suas componentes harmônicas, a figura (3.18) mostra uma comparação entre a decomposição harmônica da

corrente de linha antes e após a conexão do transformador. 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.

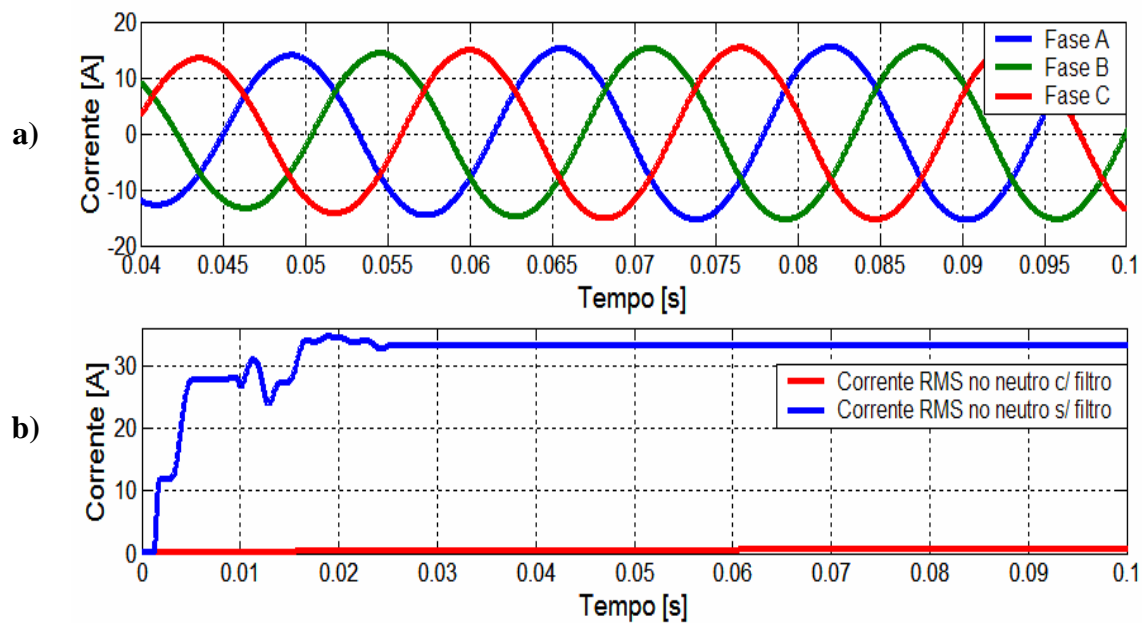


Figura 3.17 – a) Correntes de linha do sistema teste após o acoplamento do filtro. b) Correntes no neutro do sistema teste após o acoplamento do filtro.

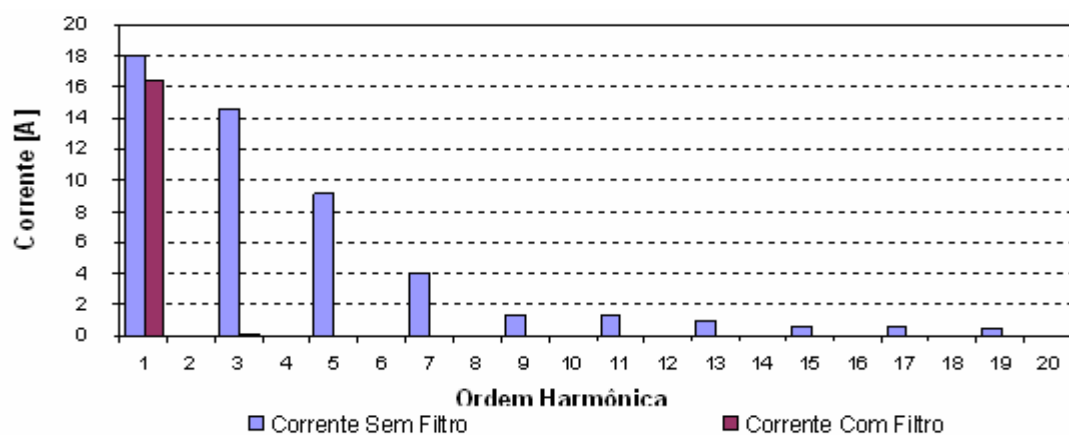
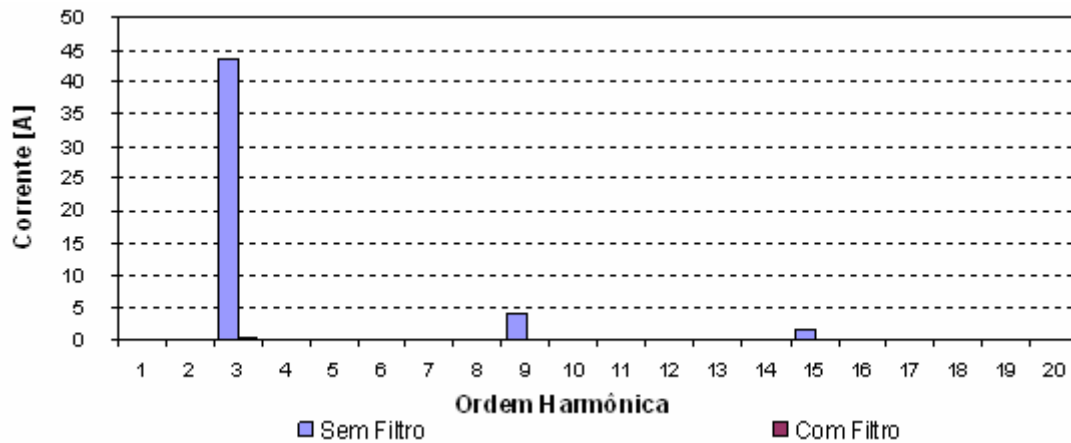


Figura 3.18 – Espectro harmônico da corrente da fase A do sistema antes e após o acoplamento do filtro.



*Figura 3.19 – Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após o acoplamento do filtro.*

A comparação entre as figuras (3.18) e (3.19) 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 (3.20) mostra como as tensões de fase se tornam distorcidas após o acoplamento do filtro e a figura (3.21) mostra o respectivo espectro harmônico para as duas situações de operação do sistema.



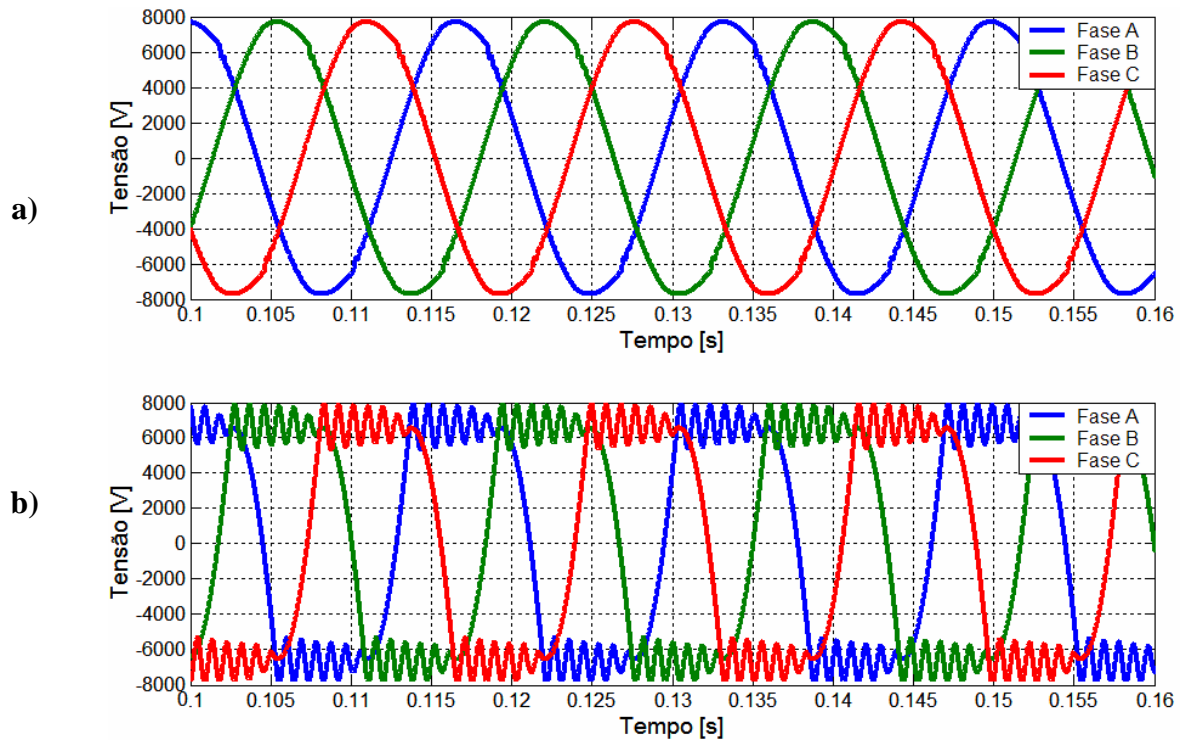


Figura 3.20 – a) Tensões de fase do sistema teste antes do acoplamento do filtro. b) Tensões de fase do sistema teste após o acoplamento do filtro.

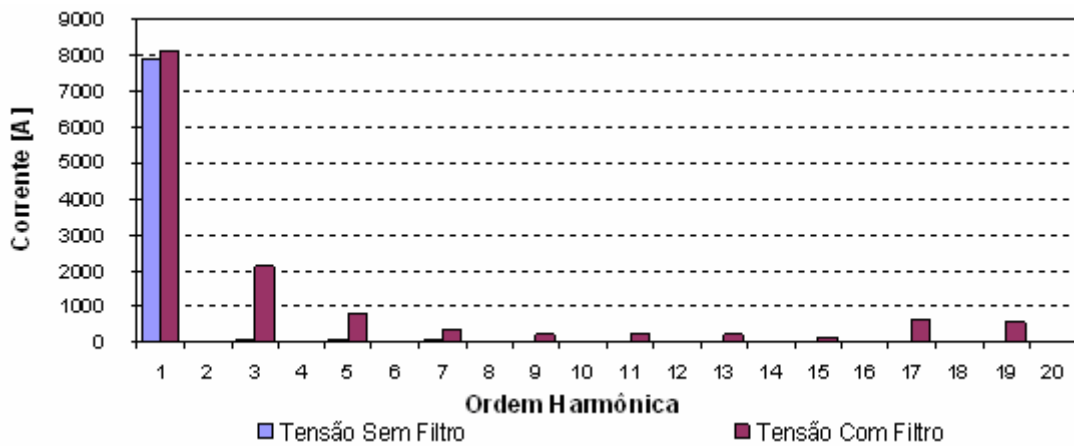


Figura 3.21 – Espectro harmônico da tensão de fase do sistema teste antes e após o acoplamento do filtro.

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								
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª
Fase s/ Filtro	17,94	0,0017	14,53	0,0007	9,127	0,002	4,0253	0,0024	1,36
Fase c/ Filtro	16,425	0,011	0,058	0,0045	0,0082	0,0029	0,0053	0,0021	0,003
Neutro s/ Filtro	0,003	0,0053	43,56	0,0053	0,0028	0,002	0,0018	0,0022	4,084
Neutro c/ Filtro	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 rotina em MATLAB 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 sua suportabilidades (*ride through*) à 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 o acoplamento 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 procedimento 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 acoplamento do dispositivo com o sistema. Enquanto 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 frequência 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 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 (3.22) ilustra o diagrama de um circuito RLC em série, alimentado por uma fonte de tensão.

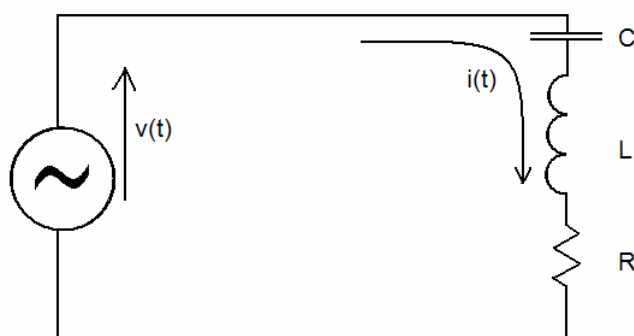


Figura 3.22 – Diagrama de um circuito RLC em série ressonante.

De acordo com as características e conceitos da ressonância série, na qual o circuito da figura (3.22) 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:

$\omega$ : é a frequência angular da fonte de alimentação.

Como se sabe, com a variação da frequência da fonte, haverá uma frequência 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 indutivos e capacitivos do circuito. Portanto, pode-se concluir que a frequência  $\omega_0$  é característica de circuitos RLC. Isso significa que, se houver qualquer fonte de alimentação com frequência variável e esta assumir o valor  $\omega_0$ , esta fonte fará com que o circuito em questão entre em ressonância série.

### **3.2.3.2 – PARAMETRIZAÇÃO 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 do acoplamento do filtro é óbvia, e assim sendo, a figura (3.23) mostra os sinais de tensão e corrente antes do acoplamento 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 (3.24) e (3.25) apresentam os espectros harmônicos das correntes da fase A e da corrente que flui pelo neutro do sistema antes do acoplamento do filtro.

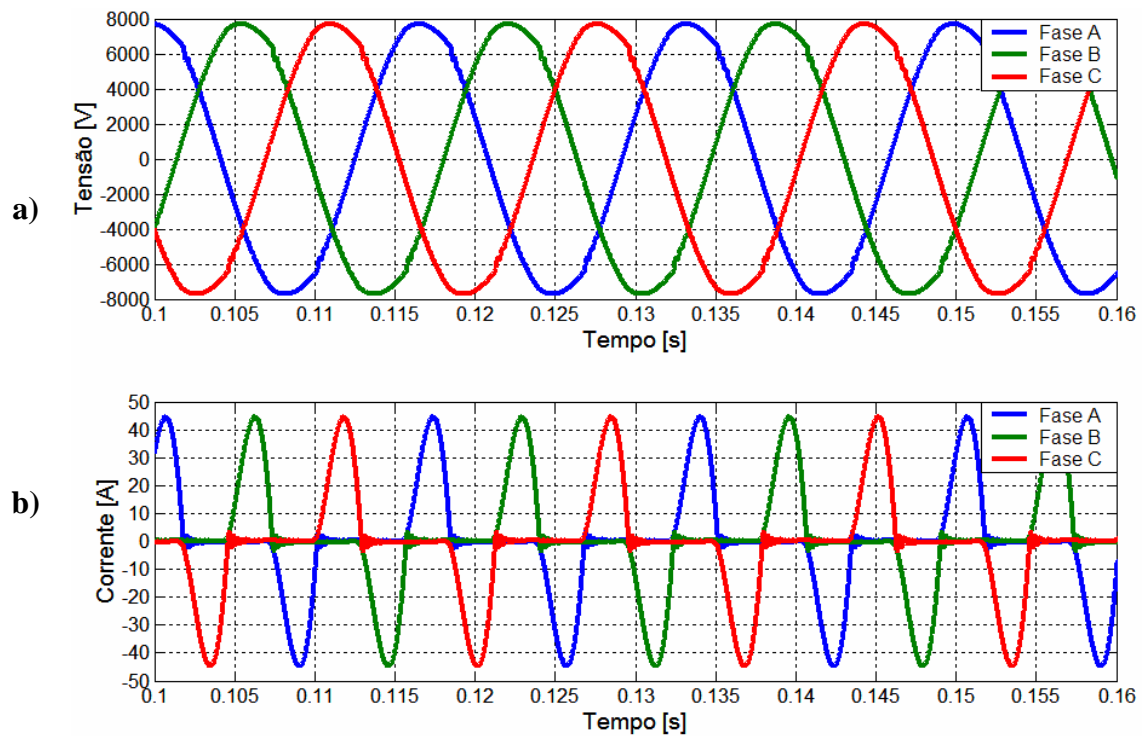


Figura 3.23 – a) Tensões de fase do sistema teste antes do acoplamento do filtro. b) Correntes de linha do sistema teste antes do acoplamento do filtro.

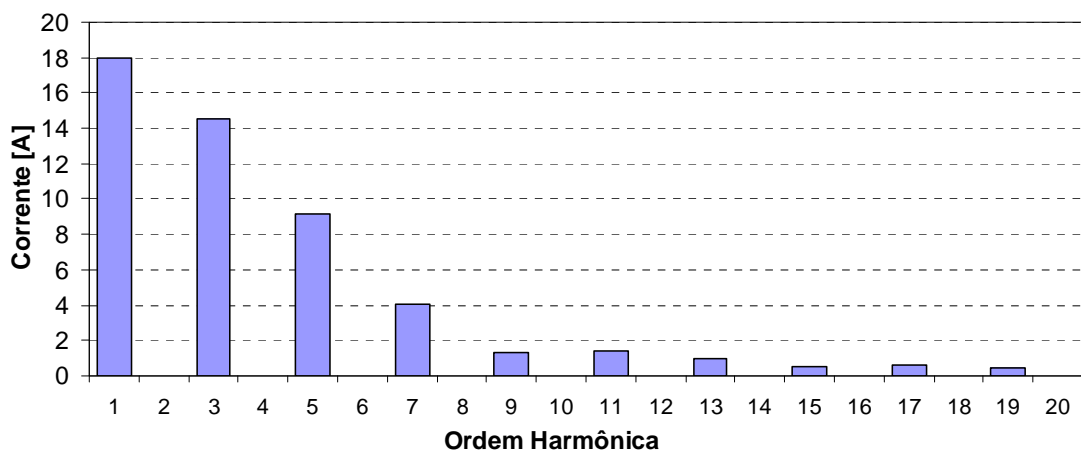


Figura 3.24 – Espectro harmônico da corrente da fase A antes do acoplamento do filtro.

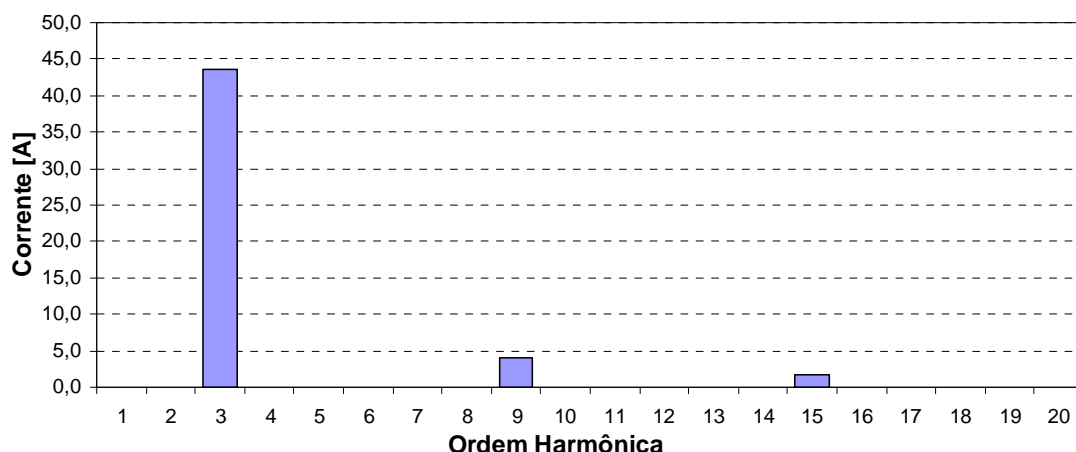


Figura 3.25 – Espectro harmônico da corrente circulante pelo neutro do sistema da figura 3.1.

Diante das medições realizadas no sistema antes do acoplamento 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, tendo em vista ser a corrente de maior magnitude apresentada pela figura (3.3).

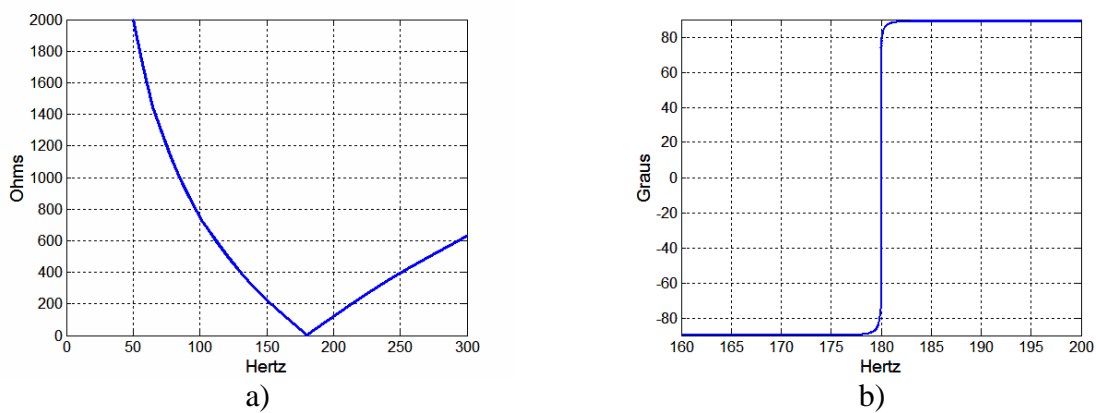
Assim, a tabela (3.6) resume os resultados dos cálculos para a determinação dos parâmetros do filtro tipo 3, aqui considerado. Maiores detalhes dos cálculos poderão ser encontrados no anexo desta dissertação.

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 $fp = 0,96$ (VAr)	39562,2
Potência reativa a ser fornecida pelo filtro (VAr)	61942,7
Reatância do filtro	1001,4
Impedância do capacitor na fundamental	1126,58
Capacitor (uF)	2,354
Reator (H)	0,33204
Fator de qualidade (Q) $X_L / R$	60

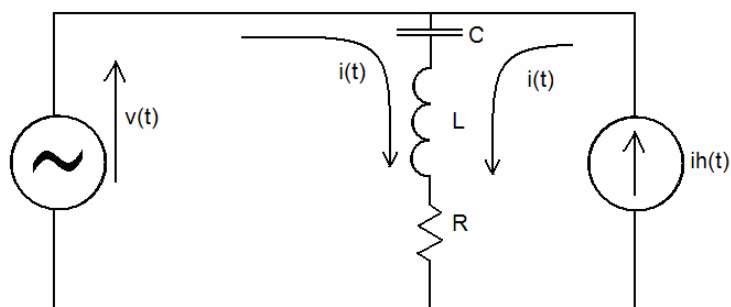


As figuras (3.26a) e (3.26b) mostram, respectivamente, a variação do módulo e do ângulo da impedância do filtro, em função da frequência. Esta representação é importante, pois mostra o funcionamento do filtro, podendo ser observado que, quando a frequência do sistema coincide com a frequência de ressonância do filtro (neste caso, 300 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).



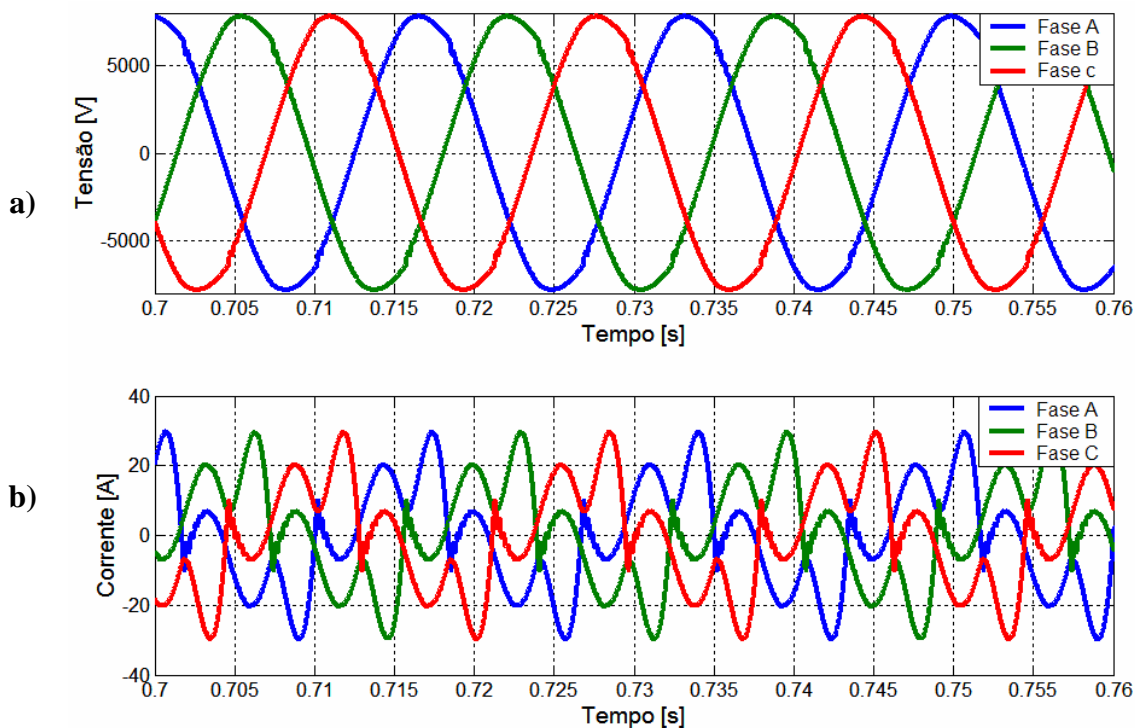
*Figura 3.26 – a) Módulo da impedância do filtro em função da variação da frequência. b) Variação do ângulo da impedância do filtro com a frequência.*

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 (3.27) ilustra o diagrama do circuito resultante do filtro em questão.



*Figura 3.27 – 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 (3.28a) e (3.28b), as formas de onda das tensões e da corrente no barramento de acoplamento do filtro com o sistema. Objetivando verificar a eficiência do filtro, as figuras (3.29) e (3.30) apresentam, respectivamente, o espectro harmônico das correntes de fase e de neutro após o acoplamento 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 3.28 – a) Tensões de fase do sistema teste após o acoplamento do filtro. b) Correntes de linha do sistema teste após o acoplamento do filtro.*

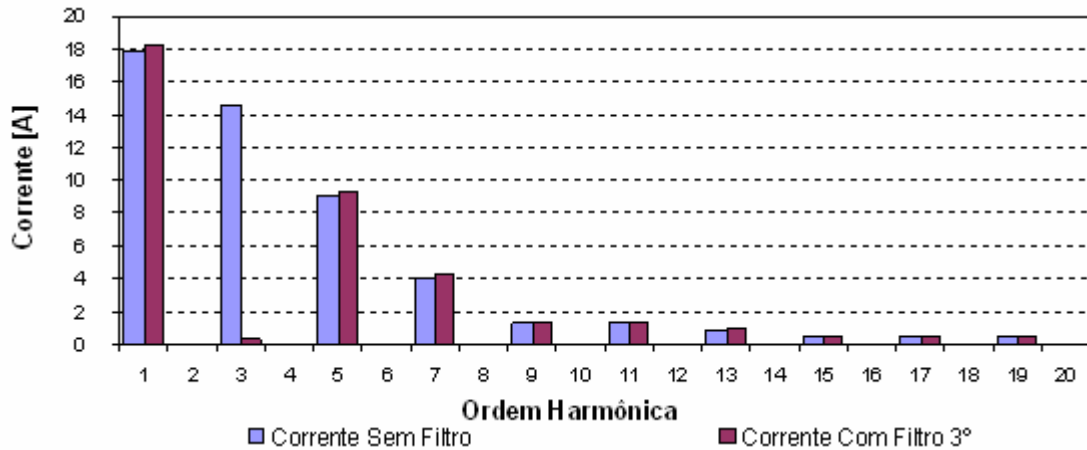


Figura 3.29 – Espectro harmônico da corrente da fase A após acoplamento do filtro.

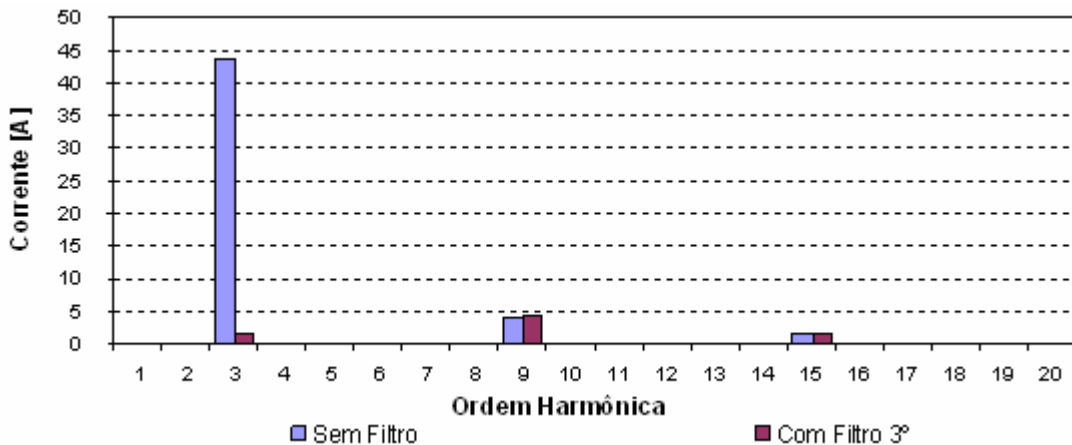
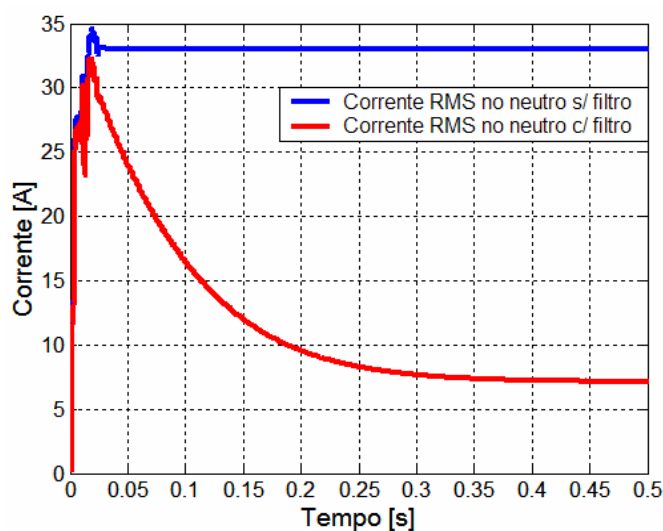


Figura 3.30 – Espectro harmônico da corrente no neutro após acoplamento do filtro.

Das figuras (3.29) e (3.30) 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 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 do acoplamento do filtro a distorção harmônica total da corrente de fase que era de 99,15%, passou para 58,4% após o acoplamento do filtro.

Adicionalmente, a figura (3.31) 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. 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 3.31 – Corrente RMS no neutro do transformador sem e com o acoplamento 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.

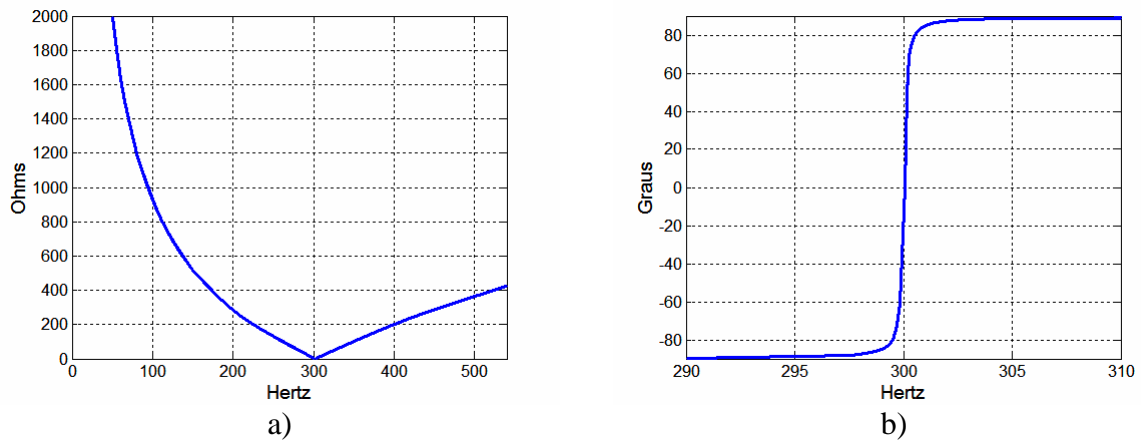
---

*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 $\text{fp} = 0,96$ (VAr)	40405,22
Potência reativa a ser fornecida pelo filtro (VAr)	37813,21
Reatância do filtro	1643,88
Impedância do capacitor na fundamental	1712,38
Capacitor (uF)	1,549
Reator (H)	0,1817
Fator de qualidade (Q) $X_L / R$	60

---

As figuras (3.32a) e (3.32b) mostram o comportamento do módulo da impedância e do ângulo desta, respectivamente, com a variação da frequência.



*Figura 3.32 – 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 (3.33a) e (3.33b) 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 (3.29) um aumento global das correntes harmônicas e da fundamental com o acoplamento do filtro. Este fato é justificado pelo fato de que o filtro de quinta ordem, assim como o filtro de terceira ordem, não é ideal, ou seja, para o sistema, além de um caminho de baixa impedância para correntes harmônicas, o filtro representa uma carga, que demanda certa quantidade de energia ativa, que é representada pelas perdas nas resistências equivalentes do filtro. Complementarmente, a figura (3.33) 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 devido à carga que os filtros representam para o sistema, na frequência fundamental. Também, na figura (3.33) é possível observar que o filtro de quinta ordem não influencia em absolutamente nada no que diz respeito ao fluxo de corrente pelo neutro, o que é uma afirmativa óbvia.

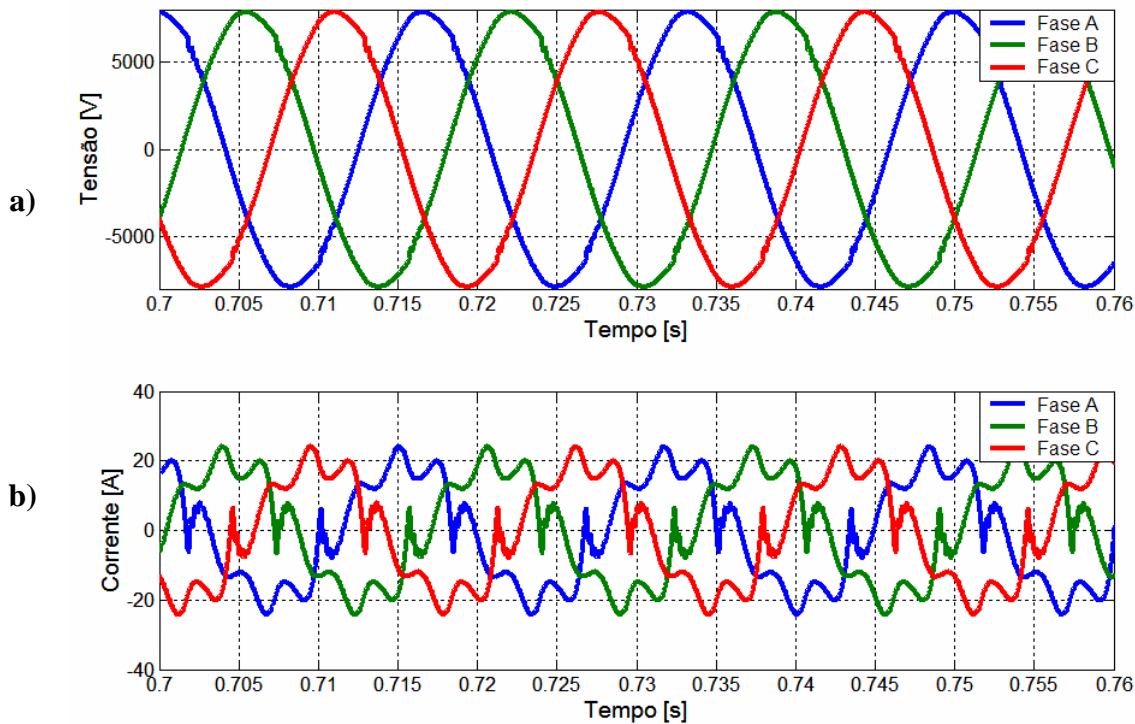


Figura 3.33 – a) Tensões de fase do sistema teste após o acoplamento do filtro. b) Correntes de linha do sistema teste após o acoplamento do filtro.

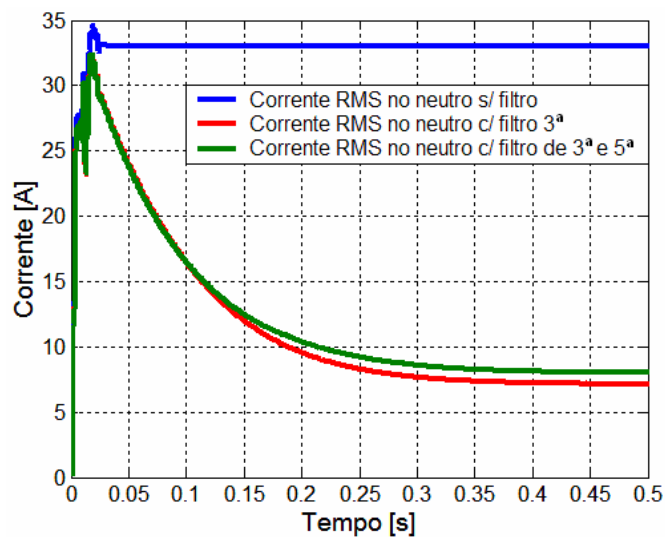


Figura 3.34 – Comparativo entre a corrente RMS que circula no neutro do transformador sem a presença dos filtros; com filtro de terceira ordem e com os filtros de terceira e quinta ordens.

A figura (3.35) 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.

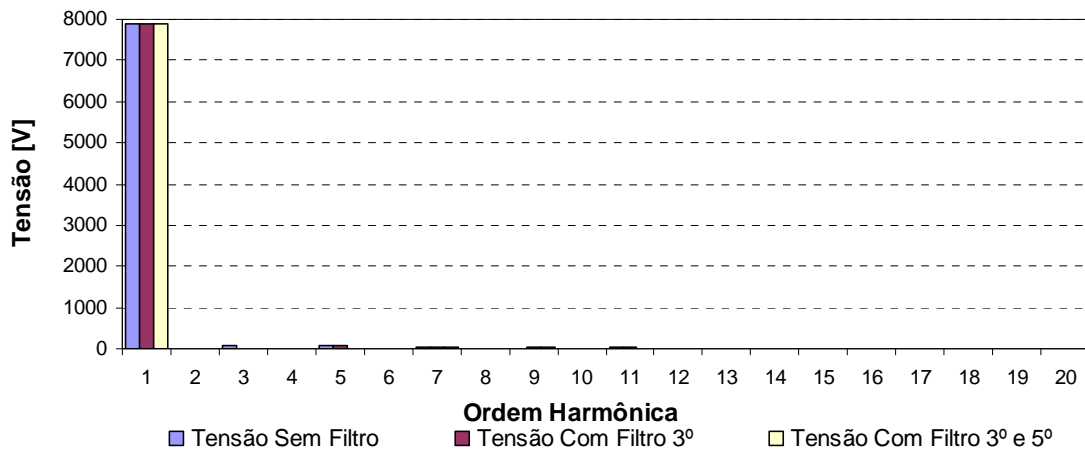


Figura 3.35 – Tensão de fase do sistema sem a presença do filtro; com o filtro de terceira ordem e com os filtros de terceira e quinta ordens.

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

A figura (3.36) 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 ordem.

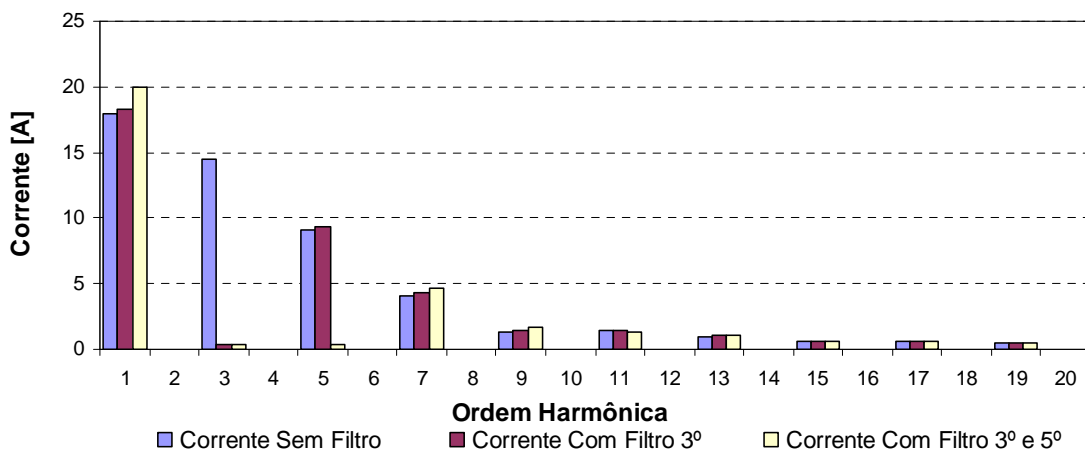
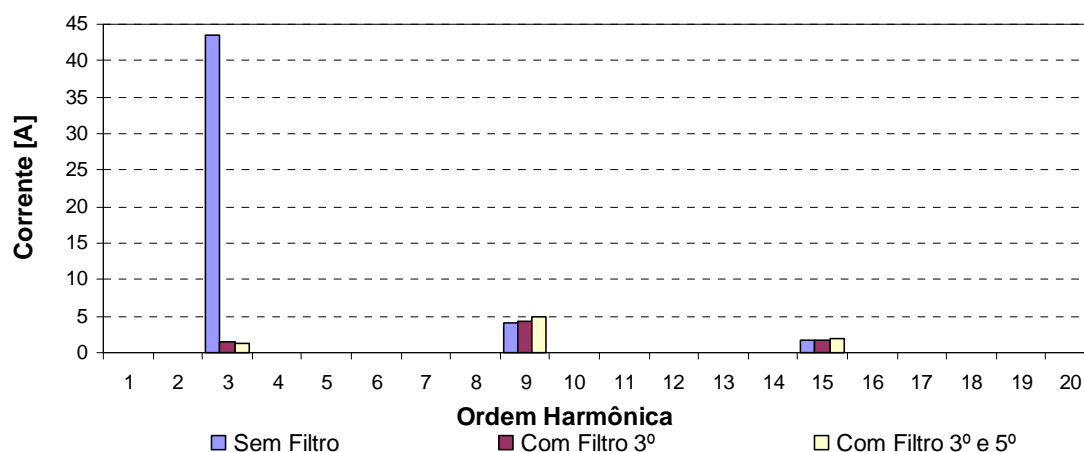


Figura 3.36 – Espectro harmônico da corrente de linha do sistema sem a presença do filtro; com o filtro de terceira ordem e com os filtros de terceira e quinta ordens.

Por fim, a figura (3.36) 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 (3.37) mostra o espectro harmônico da corrente do neutro do sistema antes e após o acoplamento dos filtros no sistema. É notória a eficiência do filtro de terceira ordem na minimização da corrente de terceira ordem que circula pelo neutro do sistema, assim como também é clara a ineficiência do filtro de quinta ordem para tal objetivo.



*Figura 3.37 – Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes do acoplamento dos filtros; com filtro de terceira ordem e com os filtros de terceira e quinta ordens.*

Analogamente aos casos anteriores, a figura (3.37) 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 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 dos trabalhos consiste na operação conjunta de filtros 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 a parametrização 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 (3.38) ilustra o diagrama resultante por fase para acoplamento do filtro no sistema teste.

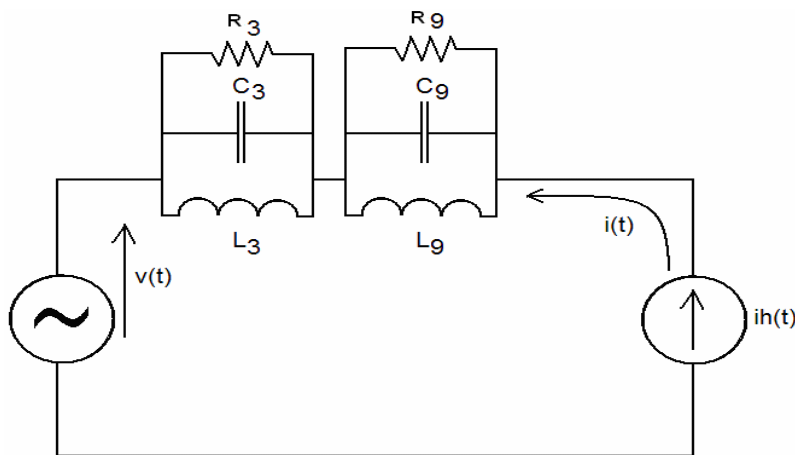


Figura 3.38 – Diagrama resultante por fase do sistema com o filtro de correntes de terceira ordem

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 ( $\omega_B$ ) 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 menor ou 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 – PARAMETRIZAÇÃO 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) utilizada como marco inicial para o cálculo dos elementos:

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

Onde:

$\Delta V_{ZF}$  : 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 e da corrente 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 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:

$\omega_0$  : frequência angular de ressonância.

A equação (3.20) acima estabelece que a parte imaginária da admitância do filtro é zero à frequência de ressonância. Sua respectiva demonstração se encontra no anexo. A 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 o exposto, a resistência pode ser encontrada pela equação (3.22) a seguir:

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

Onde:

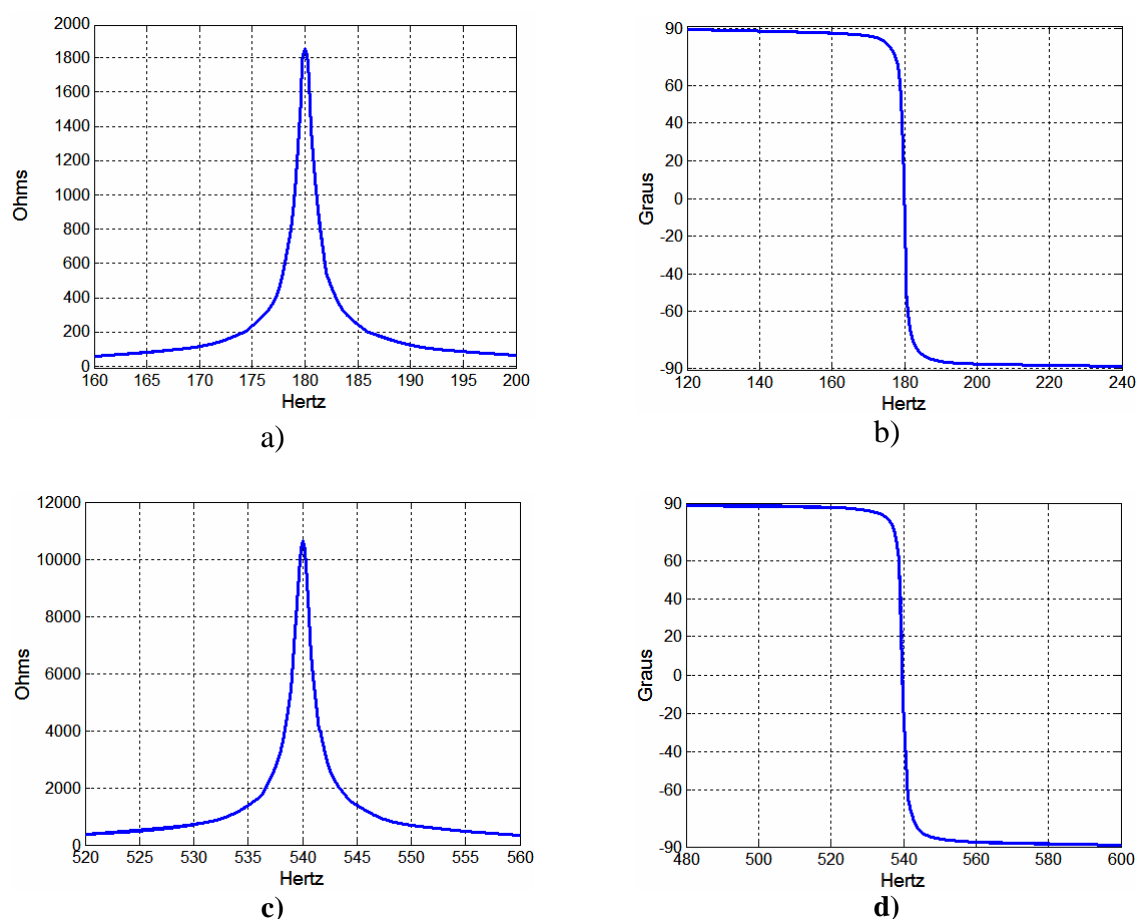
$\omega_B$  : largura de banda.

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 à este tipo de filtro, ora discutido.

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

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

As figuras (3.39a), (3.39b) e (3.39c) e (3.39d) mostram, a variação do módulo da impedância série e o seu ângulo para o filtro de terceira e nona ordens, respectivamente.



*Figura 3.39 – 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 (3.39a), (3.39c) e (3.39b) e (3.39d) 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.



Analogamente à apresentação dos resultados dos filtros no que tange ao desempenho, a figura (3.41) mostra a corrente de linha antes e após o acoplamento 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 (3.42) mostra a corrente *RMS* no neutro sem e com os filtros acoplados, podendo-se observar a sensível redução da corrente que circula no neutro.

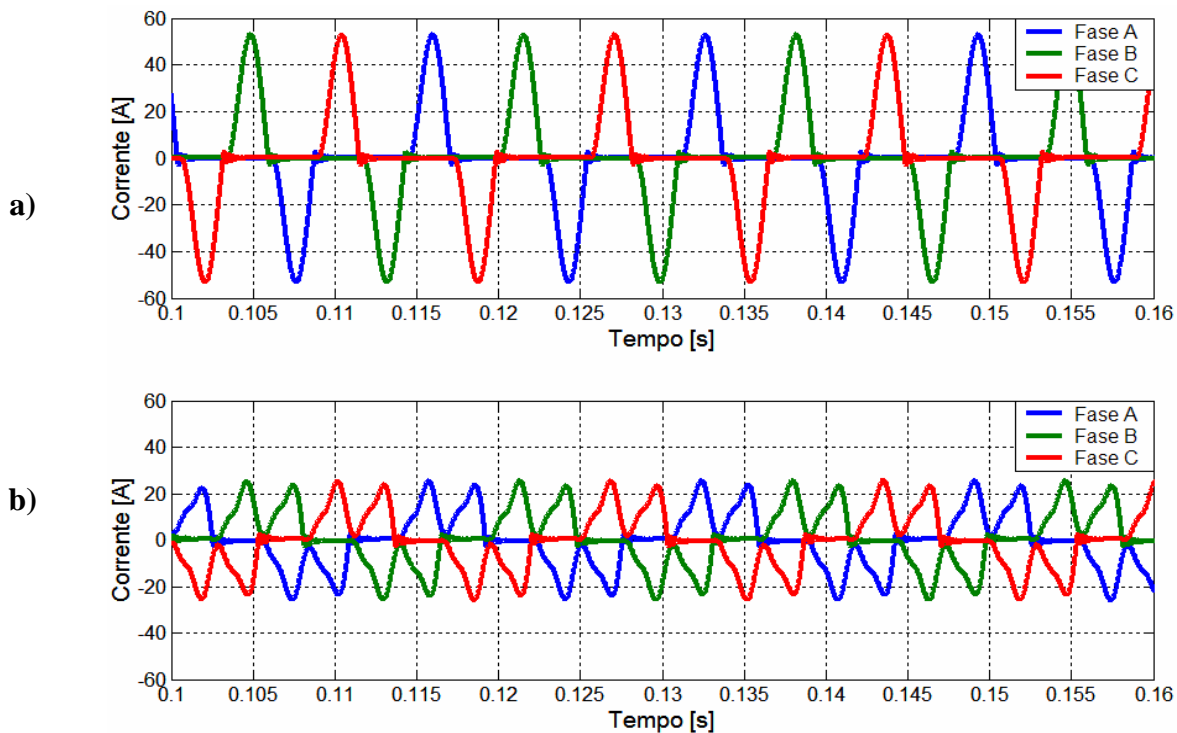


Figura 3.41 – a) Corrente de linha do sistema teste antes do acoplamento dos filtros. b) Corrente de linha do sistema teste após do acoplamento dos filtros.



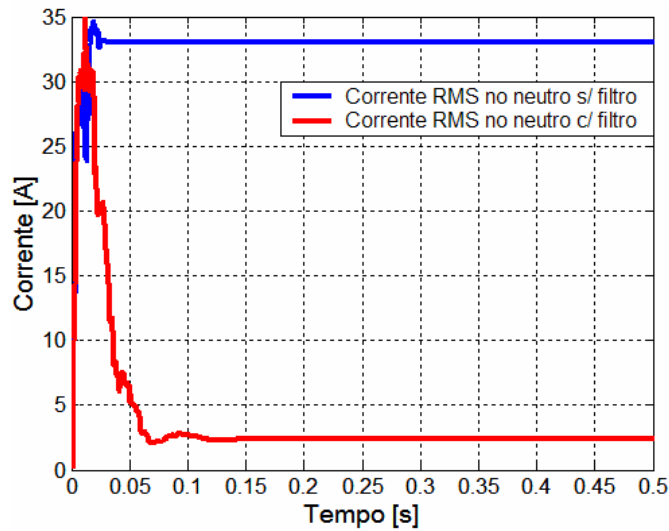


Figura 3.42 – Comparativo entre a corrente RMS que circula no neutro do transformador sem e com a presença dos filtros de 3ª e 9ª ordens.

As figuras (3.41) e (3.42) mostram a eficiência dos filtros harmônicos conectados em série com o sistema e as figuras (3.43), (3.44) e (3.45) mostram, respectivamente o espectro harmônico das tensões de fase, corrente de linha e corrente no neutro do sistema antes e após o acoplamento dos filtros.

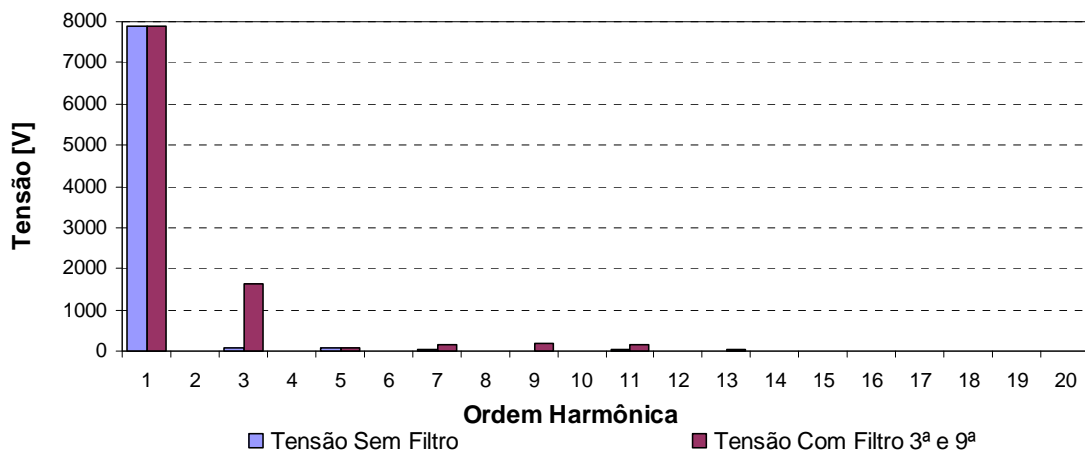


Figura 3.43 – Espectro harmônico da tensão de fase do sistema antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª e 9ª ordem.

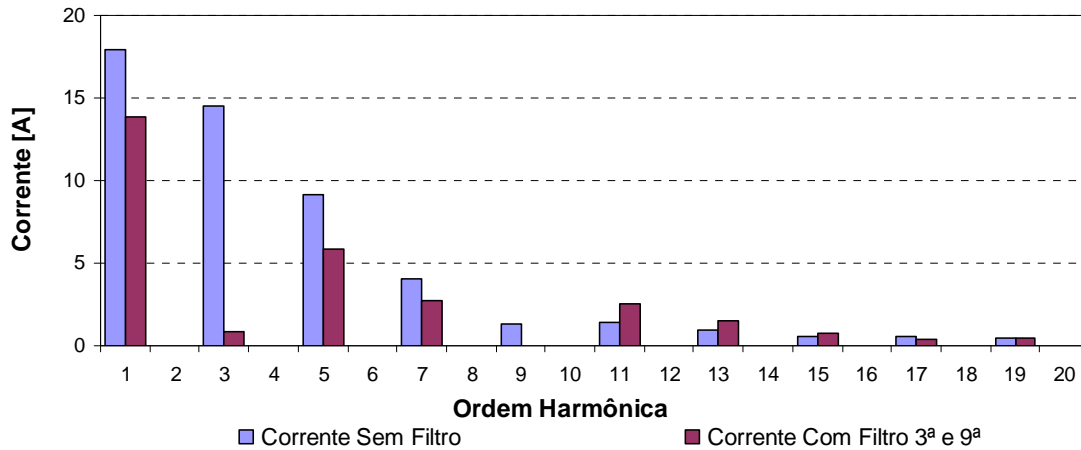


Figura 3.44 – Espectro harmônico da corrente de linha do sistema antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª e 9ª ordem.

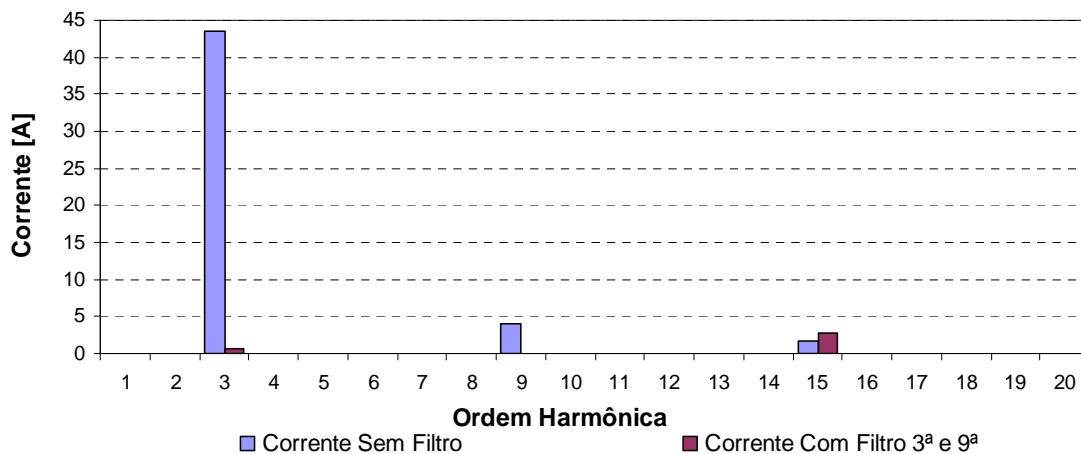


Figura 3.45 – Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª e 9ª ordem.

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 e outro para a quinta ordem, com o objetivo de obter melhorias dos índices de distorção harmônica da tensão e da corrente.

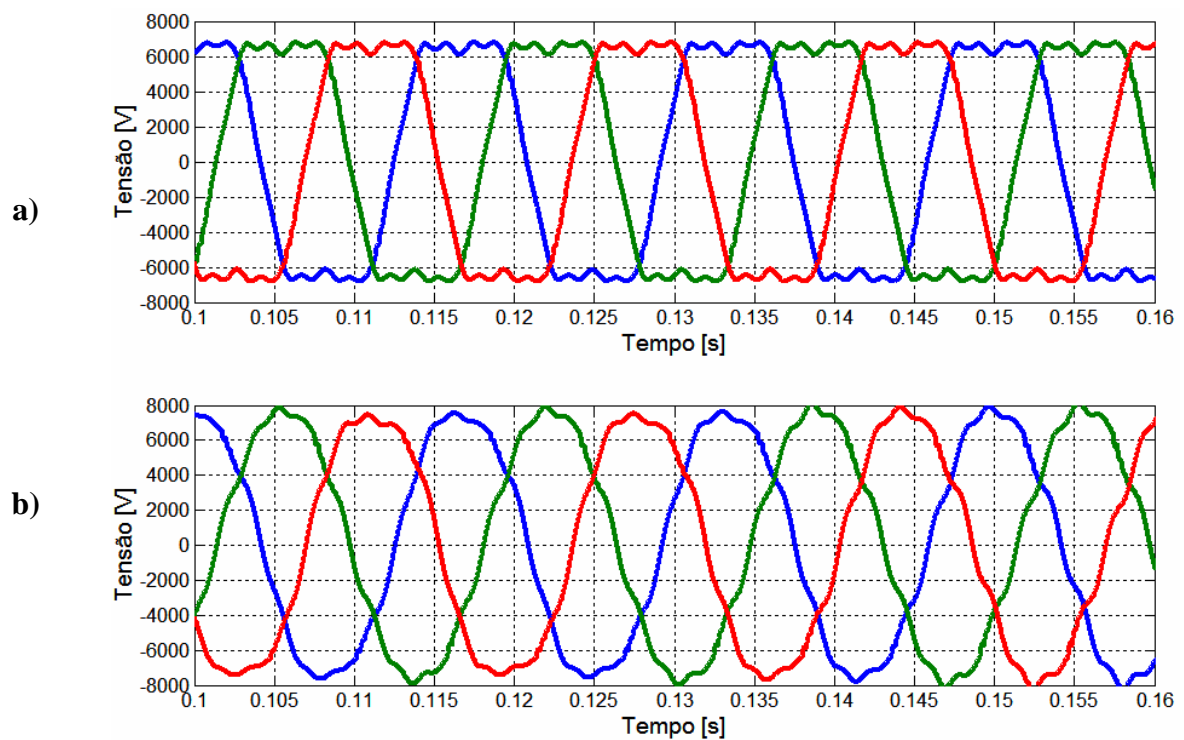
A tabela (3.9) resume o valor dos parâmetros dos filtros em derivação de terceira e quinta ordens, assim obtidos.

*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 $\mu$ F	0,4313* $\mu$ F
Resistor	0,2 $\Omega$	0,2 $\Omega$
Fator de qualidade (Q)	60	60

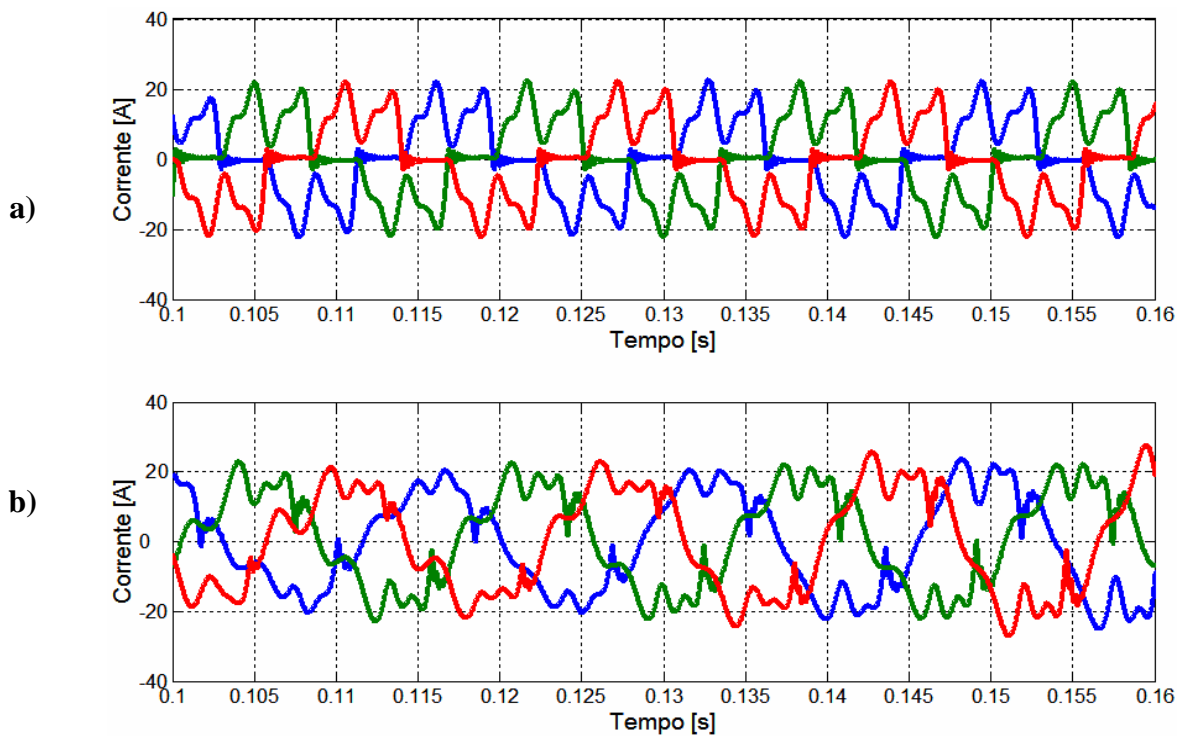
\*: Valor para ligação em delta.

As figuras (3.46a) e (3.46b) mostram as formas de onda da tensão de fase antes e após ao acoplamento dos filtros em derivação para 3ª e 5ª ordens.



*Figura 3.46 – a) Tensões de fase do sistema teste antes do acoplamento dos filtros série e derivação.  
b) Tensões de fase do sistema teste após do acoplamento dos filtros série e derivação.*

A ação dos filtros em derivação fica evidente através da inspeção das formas de onda da figura (3.46), 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 (3.47a) e (3.47b) mostra a ação dos filtros em paralelo sobre a corrente do sistema.



*Figura 3.47 – a) Correntes de linha do sistema teste antes do acoplamento dos filtros série e derivação. b) Correntes de linha teste após o acoplamento dos filtros série e derivação.*

A figura (3.48) 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.

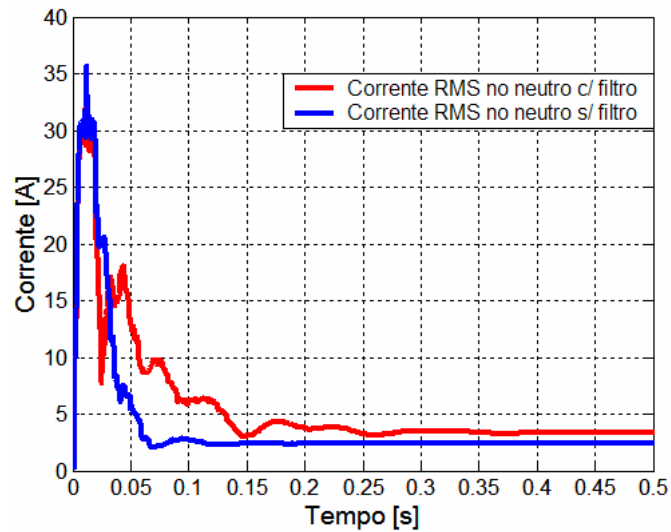


Figura 3.48 – Comparativo entre a corrente RMS que circula no neutro do transformador sem e com a presença dos filtros de 3ª e 5ª ordens.

Finalmente as figuras (3.49), (3.50) e (3.51) a seguir resumem as melhorias impostas na eficiência dos filtros série com o acoplamento dos filtros em derivação, fato este obtido se forem comparados com aqueles das figuras (3.43), (3.44) e (3.45).

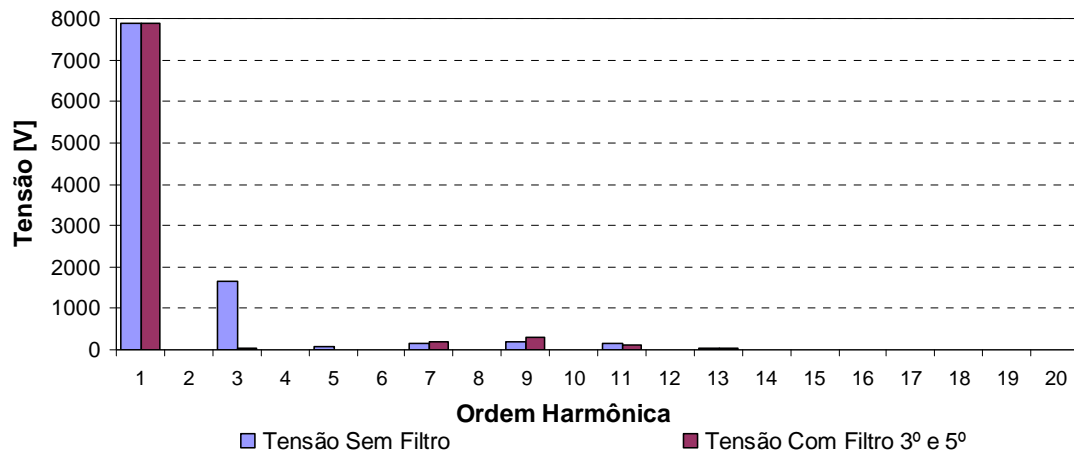


Figura 3.49 – Espectro harmônico da tensão de fase do sistema antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª e 5ª ordens em derivação.

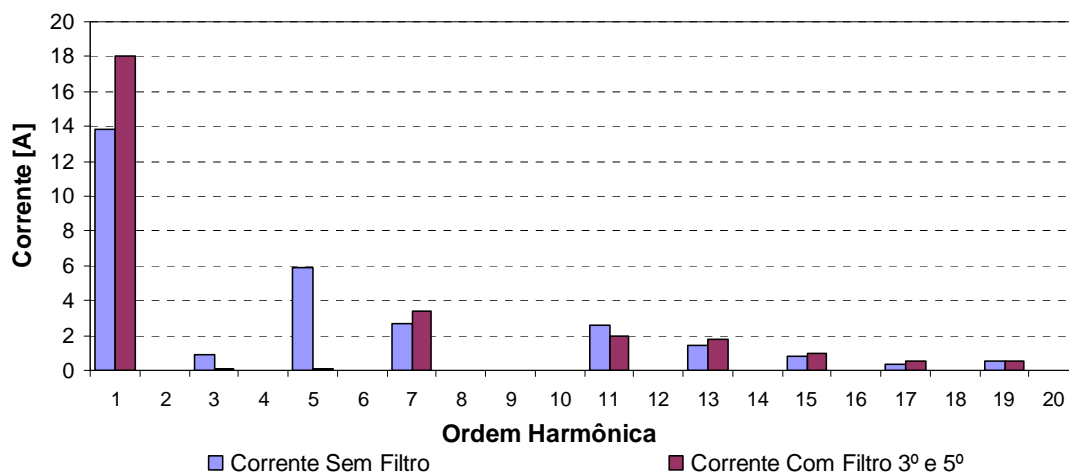


Figura 3.50 – Espectro harmônico da corrente de linha do sistema antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª e 5ª ordens em derivação.

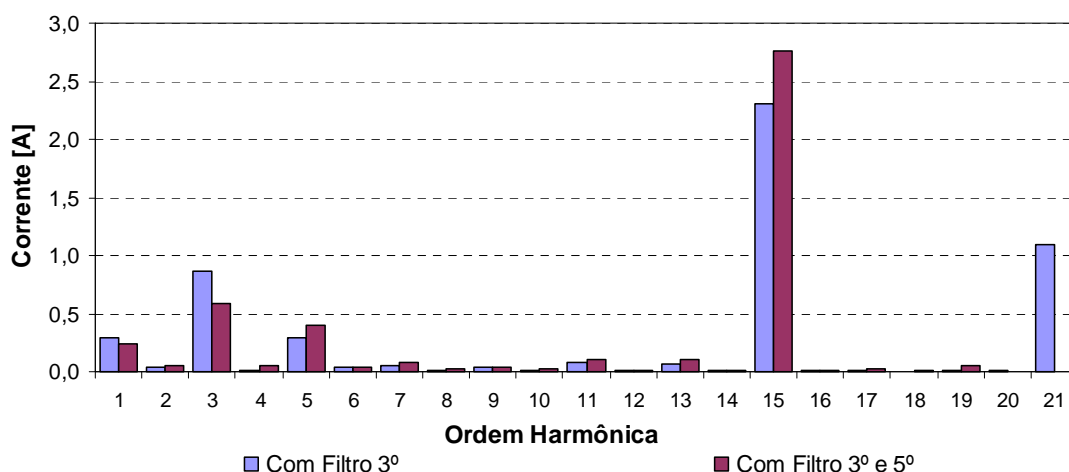


Figura 3.51 – Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª e 5ª ordem.

### 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) apresentam 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 pode ser observado nos resultados apresentados.

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

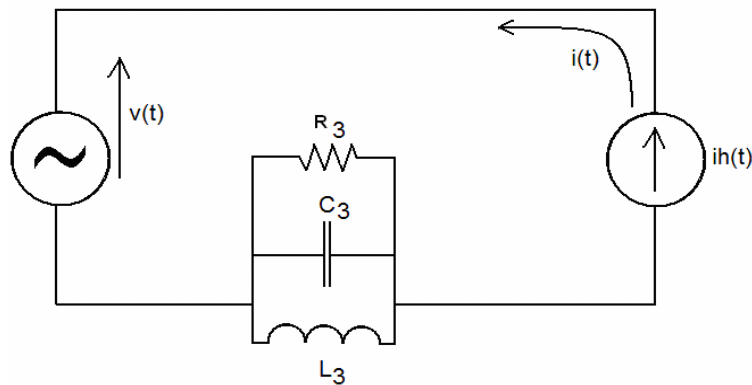
O filtro proposto neste item emprega a mesma filosofia utilizada no filtro em série do item anterior, com a vantagem de estar acoplado ao neutro, o que resulta em uma economia de dois outros filtros em comparação ao filtro do item anterior, resultando assim em três filtros foram acoplados às fases. As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

#### **3.2.5.1 – PARAMETRIZAÇÃO 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 quantidade desta componente na corrente de neutro.

A figura (3.52) 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 3.52 – 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 modelado.*

Indutância (L)	5,82 mH
Capacitância (C)	134,27 $\mu$ F
Resistor	885,6 $\Omega$
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 (3.53a) e (3.53b) mostram os resultados da simulação para as tensões de fase antes e depois do acoplamento do filtro no neutro do sistema, respectivamente.

Seguindo a mesma linha de apresentação de resultados dos filtros na simulação, as figuras (3.54a) e (3.54b) mostram as correntes de linha antes e após o acoplamento filtro no neutro sistema.



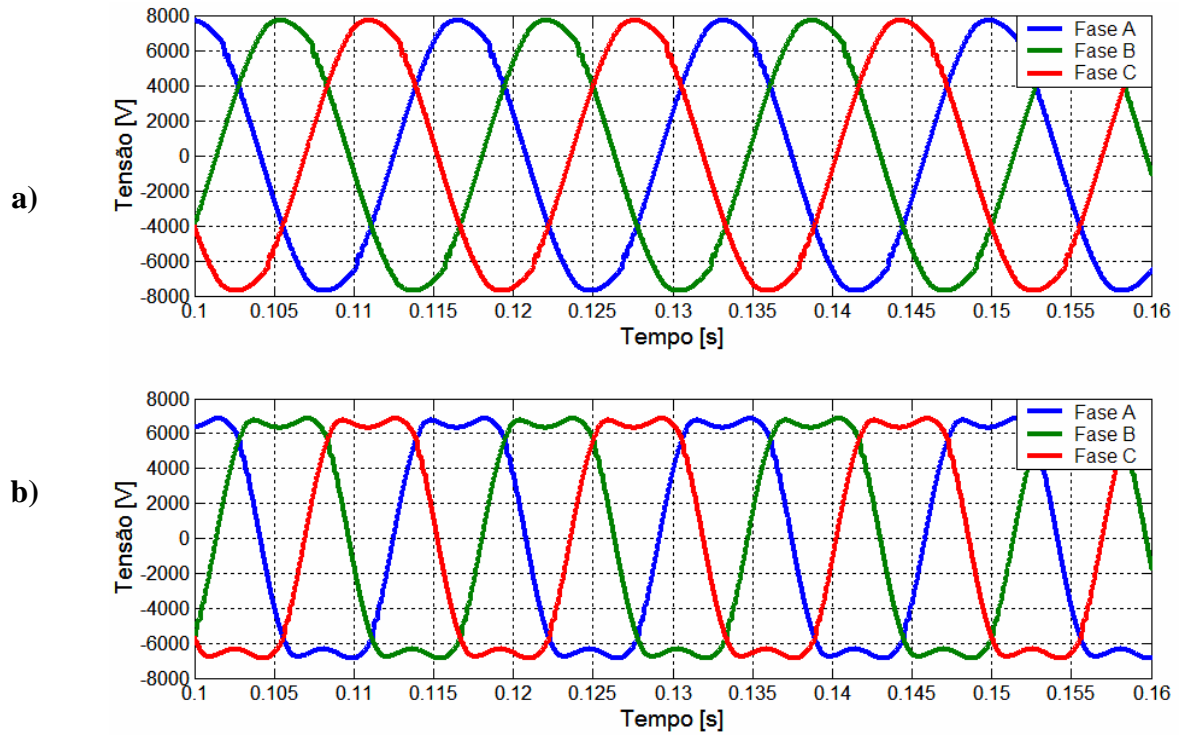


Figura 3.53 – a) Tensões de fase do sistema teste antes do acoplamento do filtro série no neutro. b) Tensões de fase do sistema teste após do acoplamento do filtro no neutro do sistema.

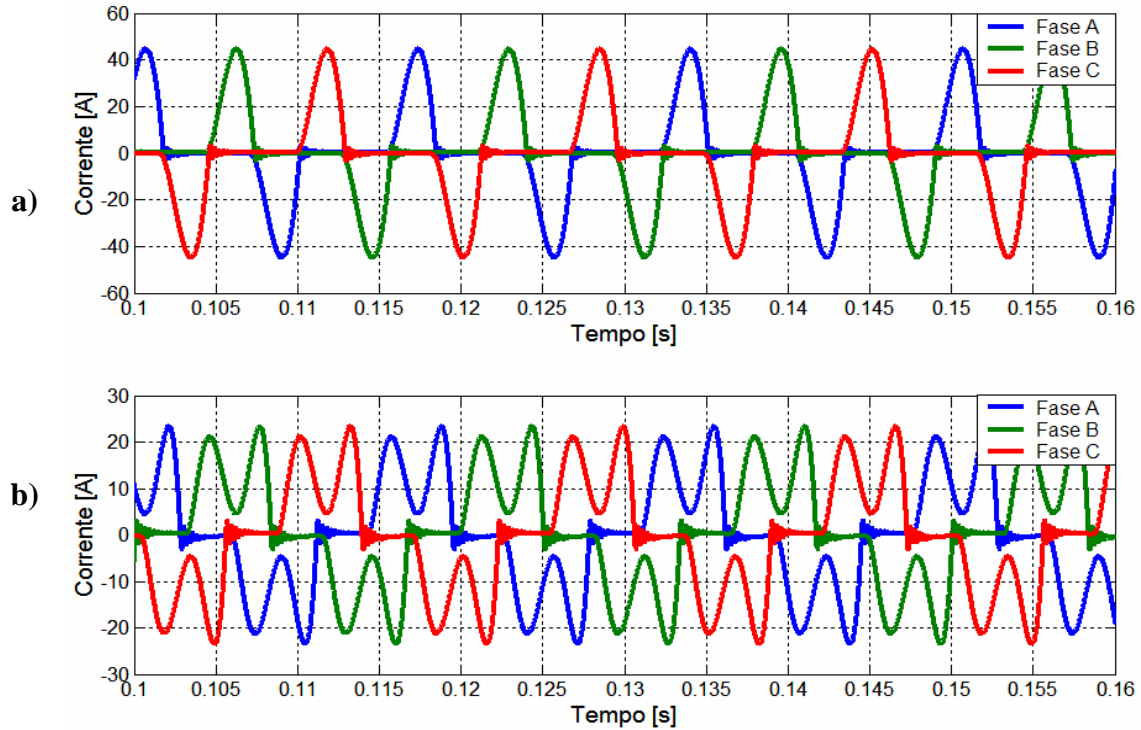


Figura 3.54 – a) Correntes de linha do sistema teste antes do acoplamento do filtro no neutro do sistema. b) Correntes de linha teste após do acoplamento do filtro no neutro do sistema.

A figura (3.55) mostra a corrente *RMS* no neutro do sistema antes e após o acoplamento do filtro, e como esperado, a corrente no neutro sofreu uma significativa redução.

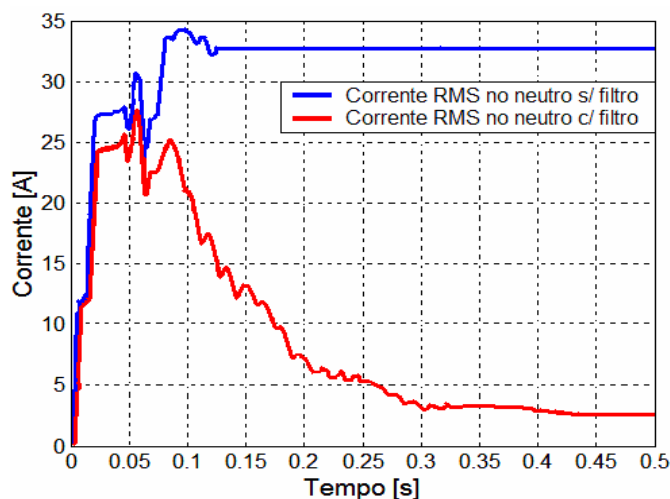


Figura 3.55 – Comparativo entre a corrente *RMS* que circula no neutro do transformador da saída do alimentador sem e com a presença do filtro de 3ª ordem no neutro.

As figuras (3.56), (3.57) e (3.58) 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.

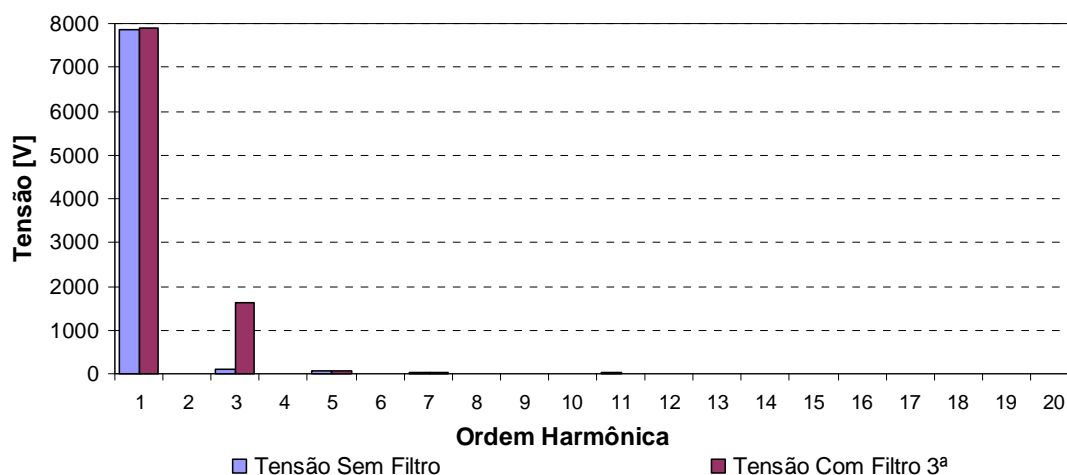


Figura 3.56 – Espectro harmônico da tensão de fase do sistema antes e após o acoplamento do filtro de 3ª ordem no neutro do sistema.

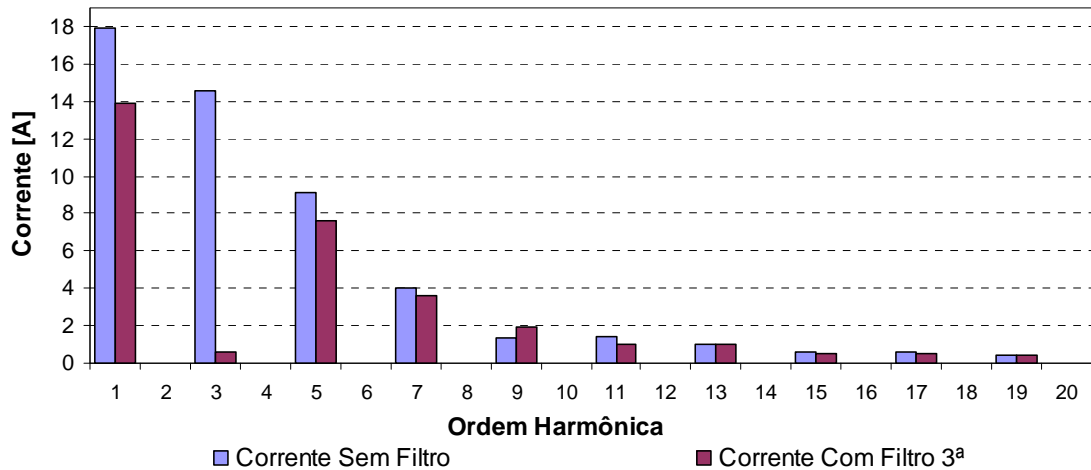


Figura 3.57 – Espectro harmônico da corrente de linha do sistema antes e após o acoplamento do filtro de 3ª ordem.

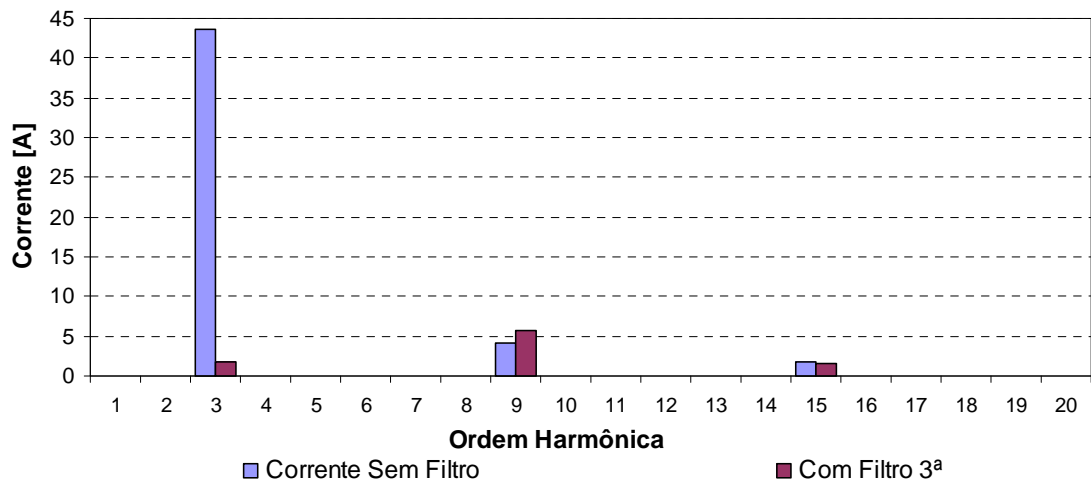


Figura 3.58 – Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após o acoplamento do filtro de 3ª ordem.

### 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 o acoplamento 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.

*Tabela 3.11 – Quadro resumo dos tipos de filtros considerados.*

<b>Tipo</b>	<b>Características</b>	<b>Desempenho</b>
<b>Tipo 1</b>	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.
<b>Tipo 2</b>	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.
<b>Tipo 3</b>	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.
<b>Tipo 4</b>	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 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.
<b>Tipo 5</b>	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 SEQUENCIA 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 mais 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, 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 regulado 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, 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.

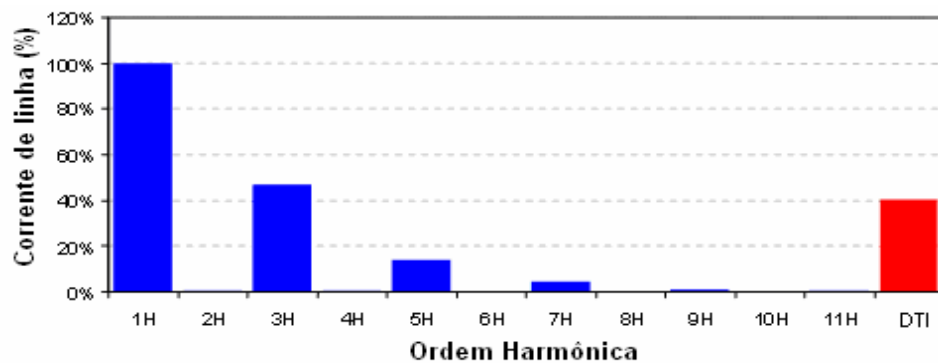


Figura 4.1 – Espectro harmônico da corrente de linha, obtido na medição.

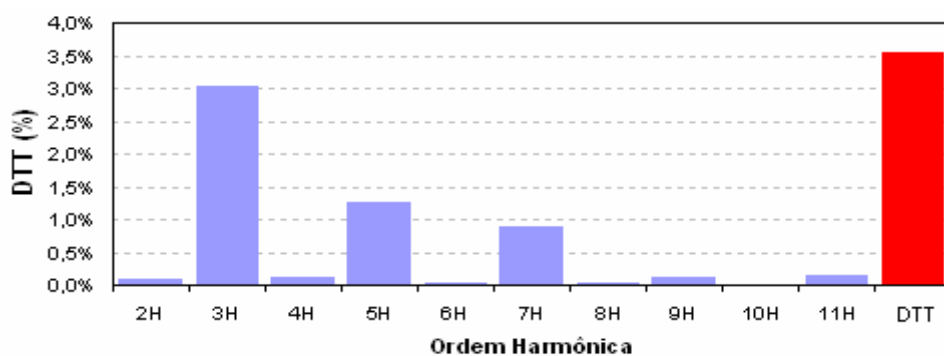


Figura 4.2 – Espectro harmônico da tensão de fase, obtido na medição.

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.

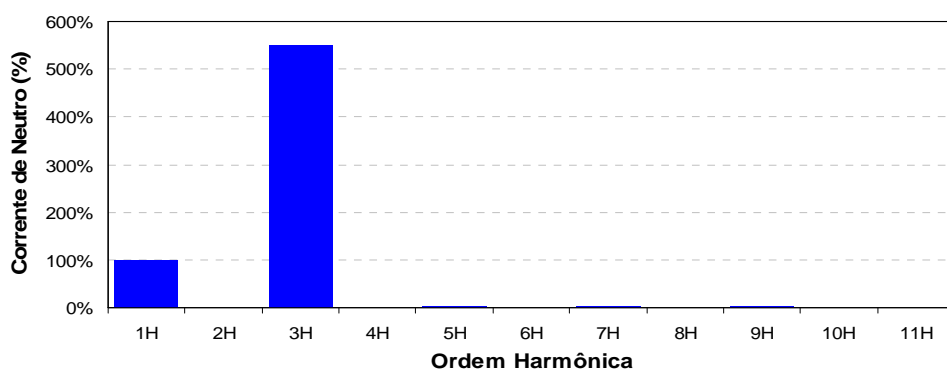
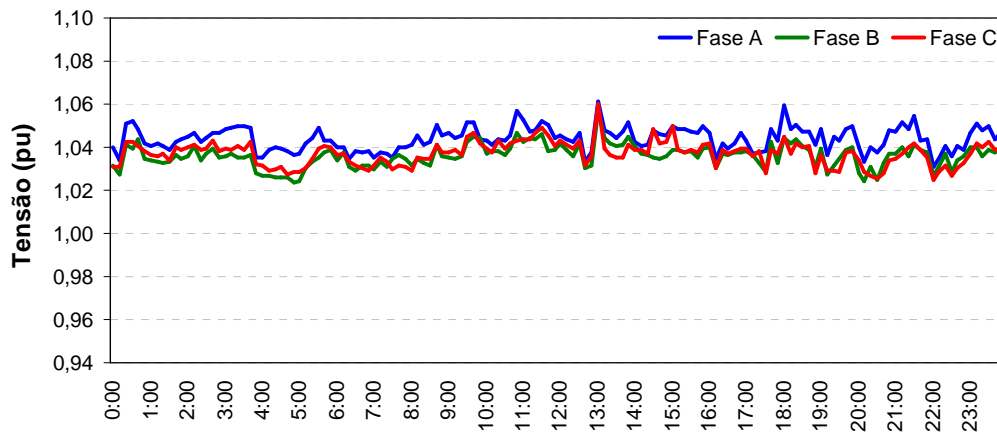
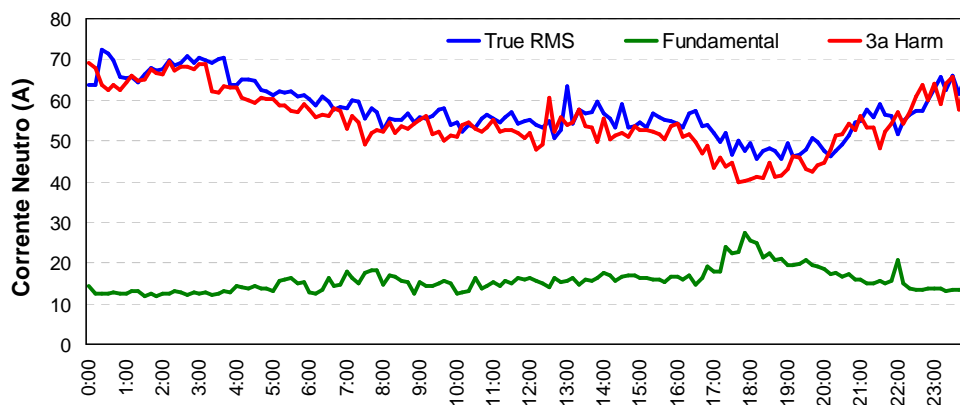


Figura 4.3 – Espectro harmônico da corrente no neutro do transformador da subestação.

Adicionalmente, as figuras (4.4) e (4.5) mostram, respectivamente o perfil de tensão e corrente de neutro obtidos nas medições em um dia típico.



*Figura 4.4 – Perfil de tensão de um dia típico, obtido pela medição (01/10/2005).*



*Figura 4.5 – Perfil de corrente no neutro de um dia típico, obtido pela medição (01/10/2005).*

Observa-se através da figura (4.5), que nos períodos de menor demanda, ou seja, no período de 0:00h e 7:00h a corrente que circula no neutro é praticamente constituída pela corrente de terceira harmônica.

## 4.2 – MODELAGEM DO ALIMENTADOR ESTUDADO NO ATP

O sistema, como informado anteriormente, foi modelado no ATP de acordo com os dados fornecidos pela ESCELSA, sendo estes informados no anexo. Salienta-se que, por se tratar de um sistema de dimensões consideráveis, o trabalho de modelagem foi bastante dispendioso e detalhado.

Por questões de limitações das medições no sistema, este foi modelado de forma a ser obtido resultados os mais próximos possíveis das constantes nas medições realizadas, foi necessária que a distribuição das cargas harmônicas no sistema modelado fosse realizada de forma aleatória.

Desta forma, a representação dos elementos representativos das linhas entre as barras, os capacitores e as cargas foram realizadas por elementos RLC devidamente modelados.

As fontes harmônicas foram modeladas através do uso da fonte FHS - *Harmonic frequency scan source*, que é uma fonte de tensão ou corrente existente na biblioteca *Frequency Component* de componentes dependentes da frequência que torna possível a modelagem de fontes de corrente ou tensão harmônica, com a entrada de módulos e ângulos de componentes harmônicas para até 11 ordem. Maiores detalhes sobre os componentes utilizados na modelagem do sistema podem ser encontrados no anexo.

A figura (4.6) ilustra as representações de alguns elementos utilizados na modelagem do sistema em estudo. A referência [50] fornece maiores detalhes sobre a utilização dos componentes existentes na biblioteca do *ATP*.

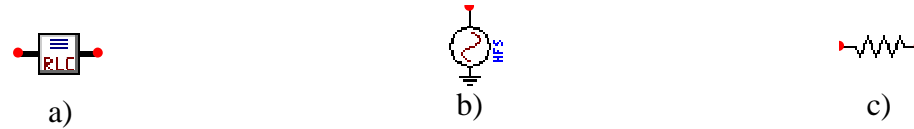


Figura 4.6 – Representações dos componentes do ATP: a) RLC série trifásico; b) Fonte harmônica; c) Resistor

Com o sistema assim modelado, o trabalho de investigações do desempenho dos filtros harmônicos foi iniciado. A análise teve como foco principal duas situações: a anterior à conexão dos filtros e após a conexão dos mesmos no sistema. Conjuntamente, foram analisadas duas localizações estratégicas no sistema: o local de acoplamento dos filtros no sistema e na saída do alimentador. Os demais pontos do sistema não foram avaliados tendo em vista as impossibilidades de verificação dos resultados através de comparações entre os resultados obtidos nas simulações e nas medições.

Assim procedendo e, como resultados iniciais das simulações, a figura (4.7) mostra as formas de onda das tensões de fase e correntes de linha na saída do alimentador.

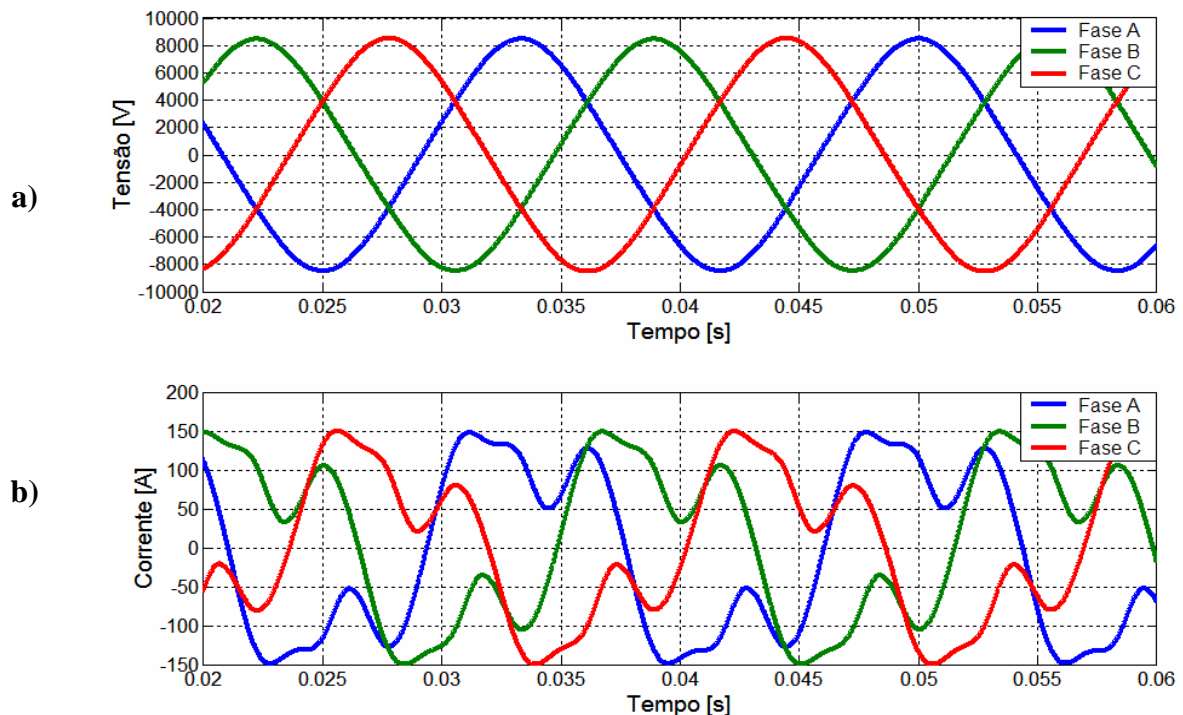
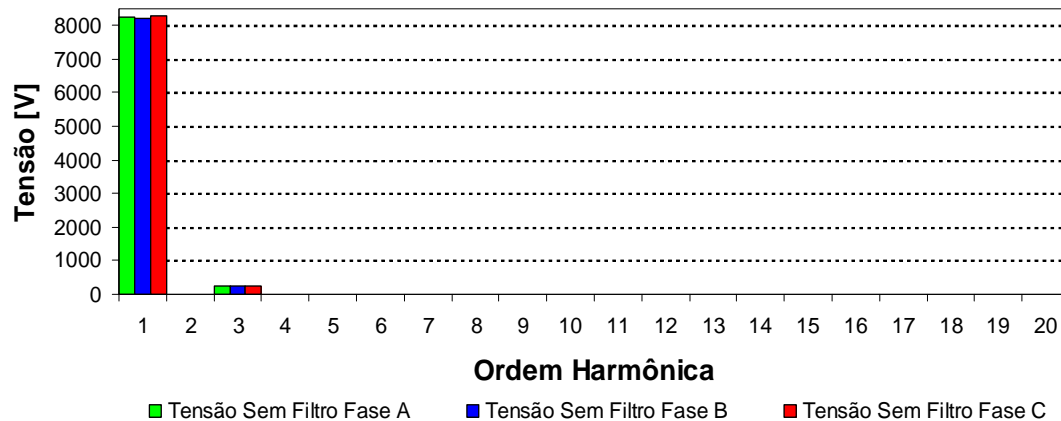
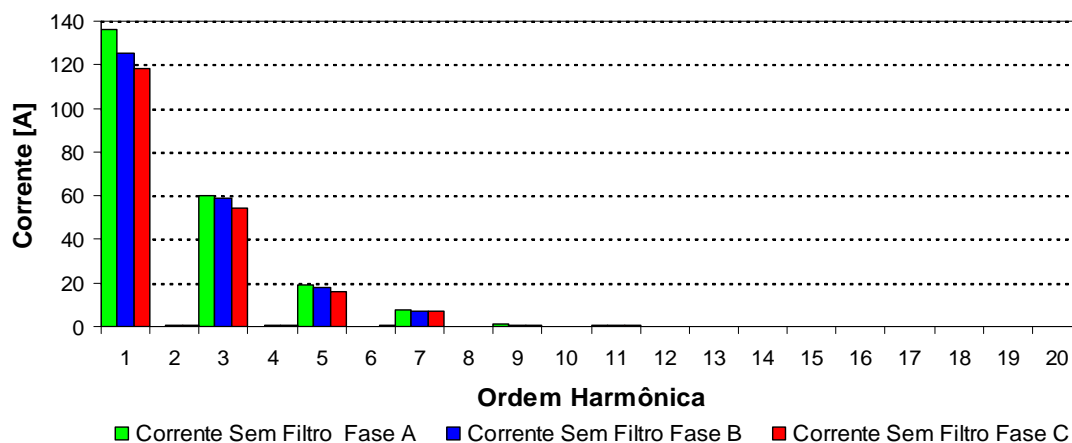


Figura 4.7 – a) Tensões de fase na saída do alimentador sem filtro. b) Correntes de linha na saída do alimentador sem filtro.

Observa-se destas figuras que, as correntes na saída do alimentador encontram-se fortemente distorcidas, devido ao elevado conteúdo harmônico presente nas mesmas. A figura (4.8) por sua vez, mostra o espectro harmônico da tensão de fase, e a figura (4.9) o espectro harmônico da corrente de linha na saída do alimentador.



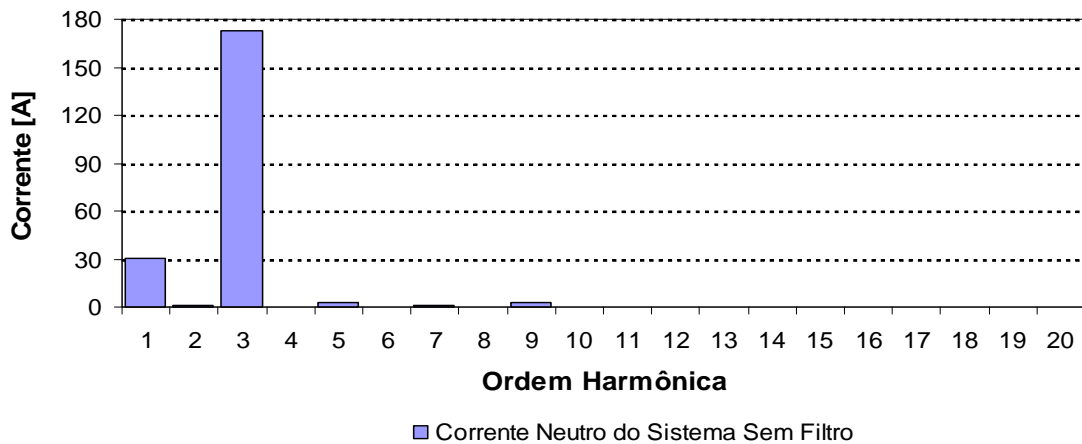
*Figura 4.8 – Espectro harmônico da tensão de fase na saída do alimentador sem a presença dos filtros.*



*Figura 4.9 – Espectro harmônico da corrente de linha na saída do alimentador sem a presença dos filtros.*

Mediante o exposto na figura (4.9), observa-se um elevado conteúdo harmônico da corrente de linha no sistema. A presença elevada de correntes de sequência zero (3ª ordem) e

a topologia do sistema sugerem que existe um fluxo intenso de correntes com esta característica no neutro do sistema, como pode ser observado na figura (4.10) a seguir.



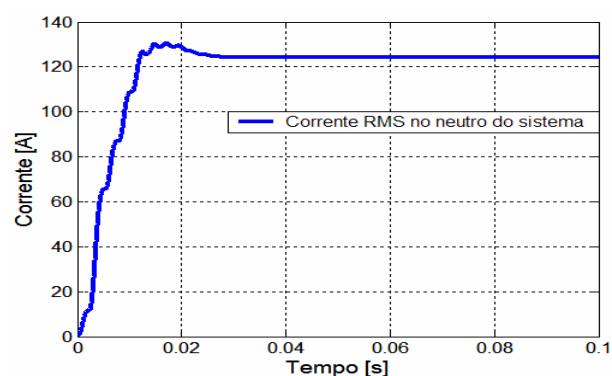
*Figura 4.10 – Espectro harmônico da corrente no neutro do transformador na saída do alimentador sem a presença dos filtros.*

O resultado da corrente apresentada na figura (4.10) é superior ao valor de 60A do ajuste do relé 51N usado na proteção do transformador do alimentador conforme já mencionado anteriormente. A figura (4.11) mostra o comportamento da corrente *RMS* no neutro do transformador. Observa-se desta que, em regime permanente, a referida corrente atinge o valor de aproximadamente 124 A, sendo a componente harmônica de corrente de terceira ordem a principal responsável por tal valor. Outro fato relevante que deve ser mencionado diz respeito ao fator de potência verdadeiro (*true power factor*). Assim, a tabela (4.1) mostra os valores do fator de potência, considerando somente a fundamental ( $\cos \phi_1$ ), e os valores considerando todas as componentes, sem a presença do filtro, no local de instalação dos mesmos.

*Tabela 4.1 – Fator de potência, por fase, no local de acoplamento dos filtros sem a presença dos filtros.*

	$\cos(\phi_1)$	$\frac{\cos \phi}{\sqrt{1 + DTI^2}}$
Fase A	0,9927	0,8995
Fase B	0,9712	0,8709
Fase C	0,9326	0,8398

Diante do exposto acima, as análises foram concentradas em dois locais distintos do sistema. O primeiro na saída do alimentador, e o segundo no local de acoplamento dos filtros com o sistema, que dista aproximadamente 12km da saída do alimentador. Este local foi considerado pelo fato de ser um local onde se concentram os pontos de ramificação do alimentador (como pode ser visto no diagrama no anexo), onde apresenta níveis de distorção de tensão e corrente próximos aos encontrados na saída do alimentador.



*Figura 4.11 – Corrente RMS no neutro do transformador do alimentador.*

A seguir, as figuras (4.12a) e (4.12b) mostram respectivamente, as formas de onda das tensões de fase e correntes de linha no local de instalação dos filtros no sistema.

Pela comparação entre as figuras (4.7a) e (4.12a) verifica-se que as tensões mostradas pela figura (4.12a) estão muito mais distorcidas que as tensões da saída do alimentador, devido ao nível de curto-circuito na saída do alimentador ser mais elevado. Por fim, as figuras (4.13) e (4.14) mostram o espectro harmônico das tensões de fase e correntes de linha no local de acoplamento dos filtros antes da instalação destes.



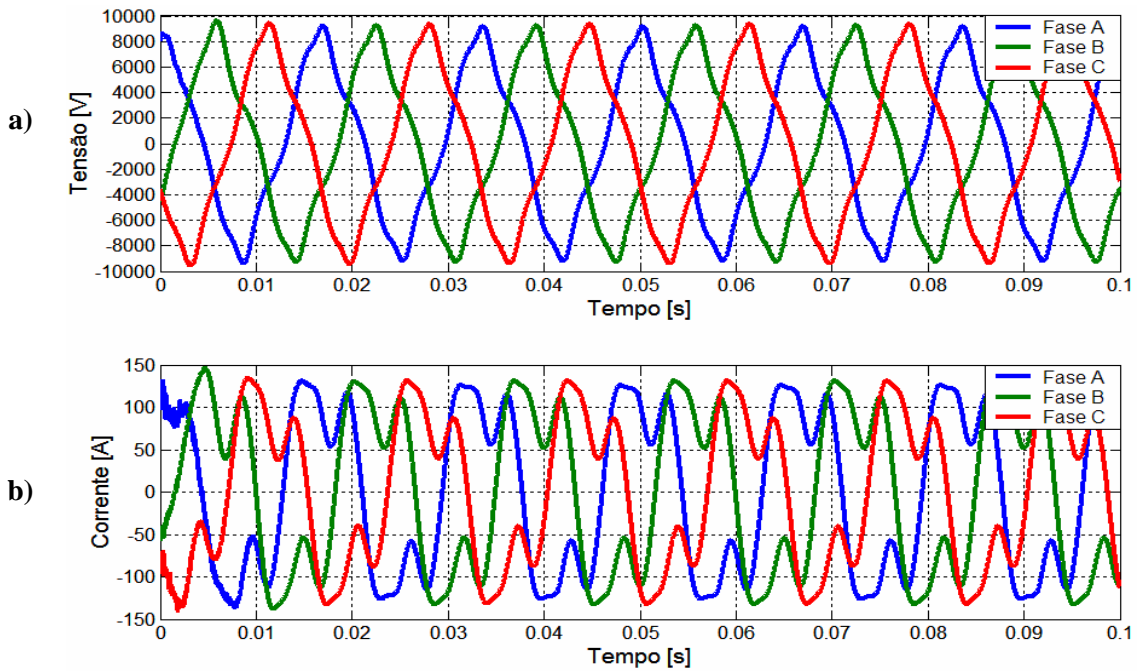


Figura 4.12 – a) Tensões de fase do sistema antes do acoplamento do banco de transformadores. b) Correntes de linha antes do acoplamento do banco de transformadores.

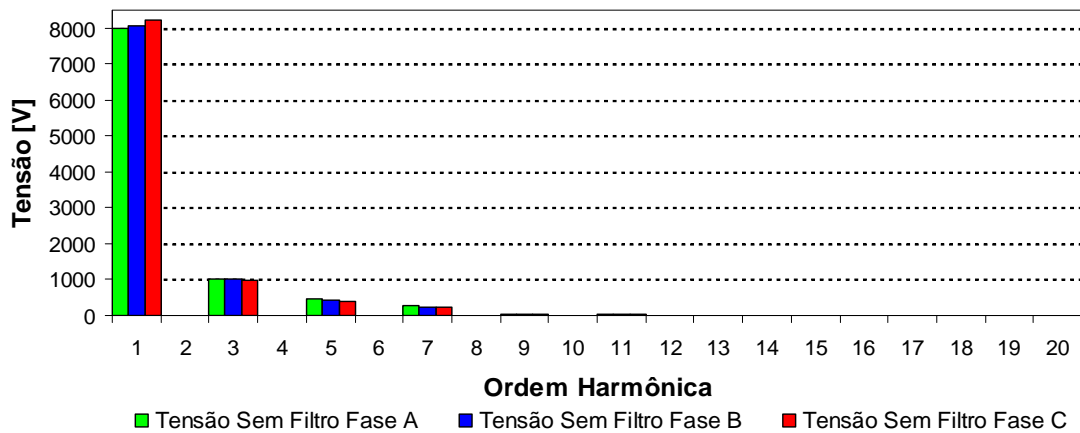
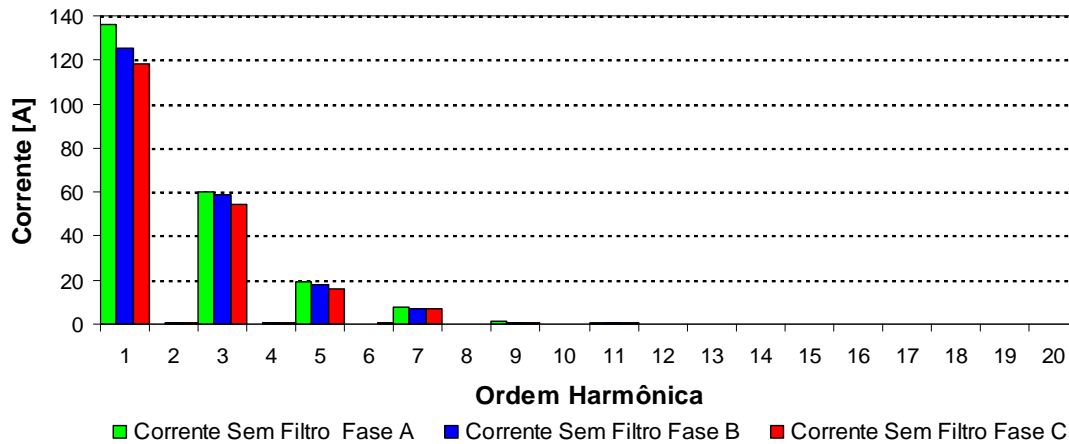


Figura 4.13 – Espectro harmônico das tensões de fase no local de acoplamento dos filtros.



*Figura 4.14 – Espectro harmônico das correntes de linha no local de acoplamento dos filtros.*

Estando assim os resultados da simulação computacional apresentados, em consonância com aqueles obtidos na medição, dar-se-á continuidade a seguir aos trabalhos de avaliação dos filtros.

### **4.3 – AVALIAÇÃO DO FILTRO TIPO 1**

Objetivando minimizar o fluxo de correntes de seqüência zero no neutro do transformador do alimentador em estudo foi modelada a estrutura de filtro do tipo 1, conforme decorrido no capítulo III. Os parâmetros utilizados para a modelagem dos transformadores foram obtidos mediante os resultados da simulação do sistema sem a presença dos filtros, de forma que os resultados fossem os mais concordantes possíveis.

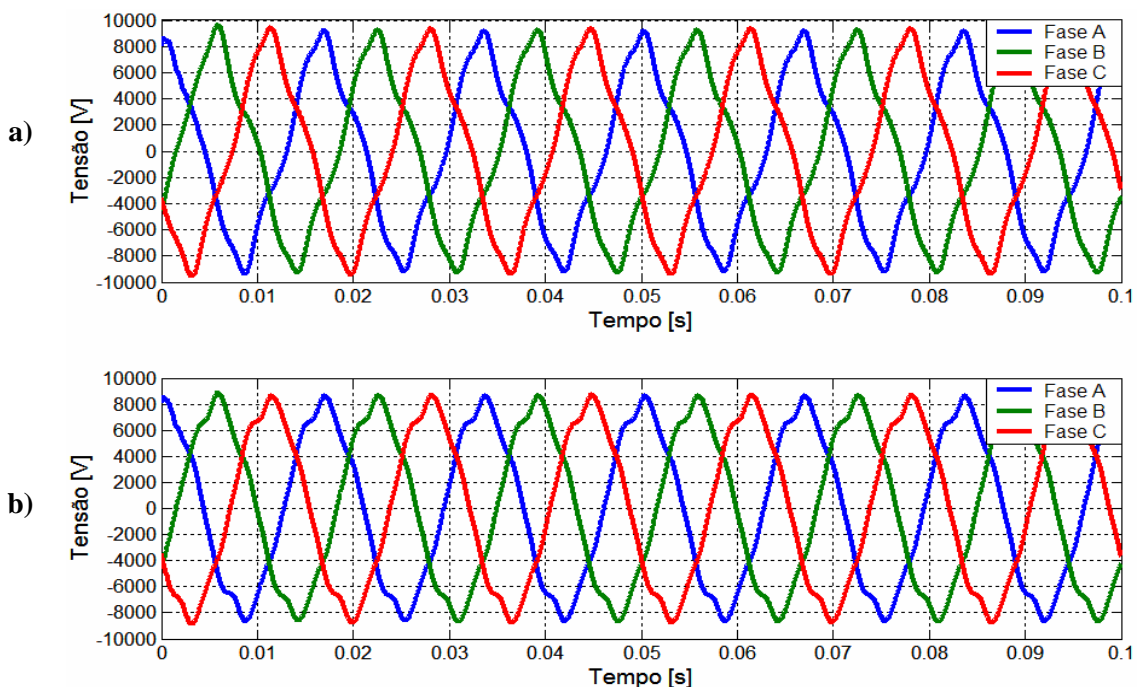
Assim, os parâmetros utilizados na modelagem dos transformadores em zig-zag são identificados na tabela (4.2) abaixo.

*Tabela 4.2 – Parâmetros dos transformadores do filtro tipo 1.*

Resistência de Magnetização ( $\Omega$ )	76753,4
Resistência do Enrolamento Primário ( $\Omega$ )	0,51814
Resistência do Enrolamento Secundário ( $\Omega$ )	0,51814
Indutância do Enrolamento Primário (mH)	0,60597
Indutância do Enrolamento Secundário (mH)	0,60597
Tensão do Enrolamento Primário (kV)	13,8
Tensão do Enrolamento Secundário (kV)	13,8

Os resultados obtidos com a aplicação do filtro eletromagnético de seqüência zero no ponto de acoplamento desejado podem ser verificados nas figuras a seguir.

A figura (4.15) mostra as formas de onda da tensão de fase no local de acoplamento antes e após o acoplamento do filtro. Como se observa, a distorção harmônica de tensão foi minimizada com a conexão do filtro, e também que o fator de crista da onda de tensão foi minimizado, sendo este um indicador da eficiência do banco de transformadores no que diz respeito à filtragem de correntes harmônicas.



*Figura 4.15 – a) Tensões de fase do sistema antes do acoplamento do banco de transformadores. b) Tensões de fase após o acoplamento do banco de transformadores.*

Á título de comparação os espectros harmônicos das tensões de fase antes e após o acoplamento do banco de transformadores no local de conexão do filtro é mostrada na figura (4.16).

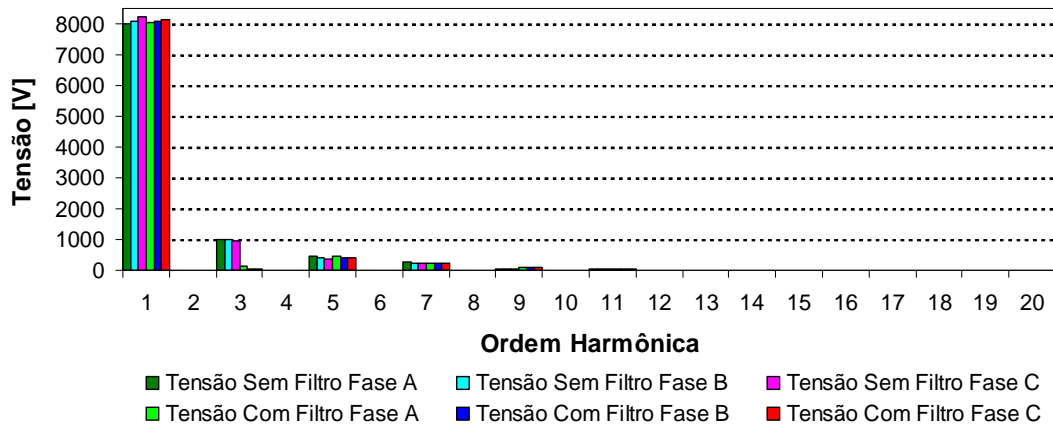


Figura 4.16 – Espectro harmônico das tensões de fase no local de acoplamento, antes e após a conexão do filtro eletromagnético.

A figura (4.17) mostra as correntes de linha antes e após o acoplamento do banco de transformadores no local de acoplamento do filtro.

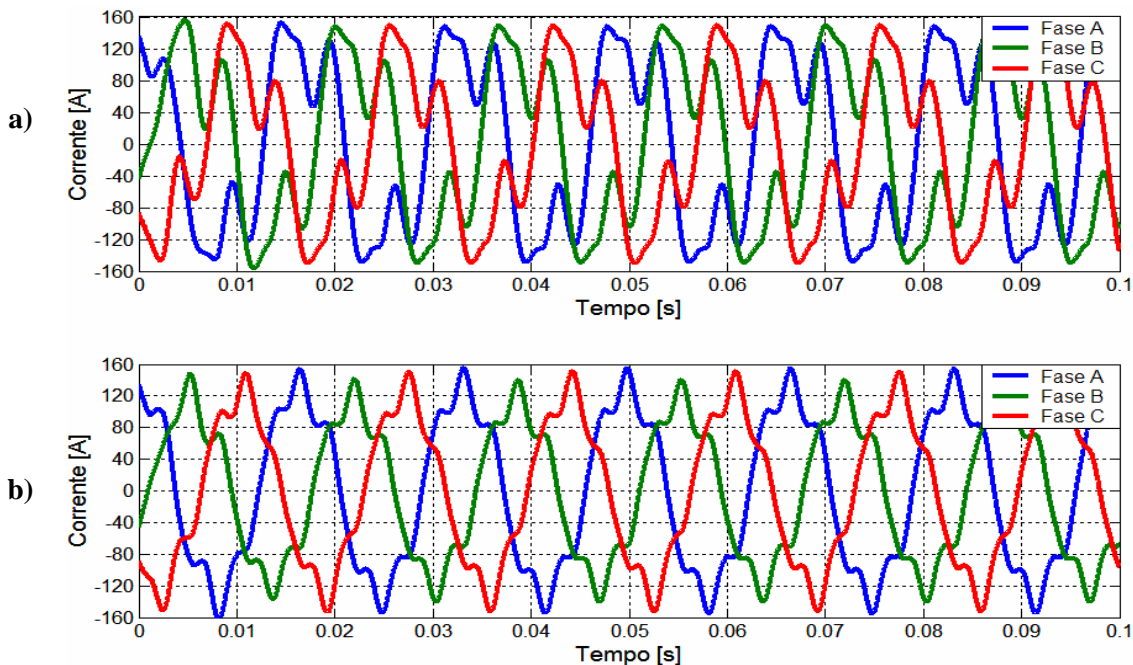
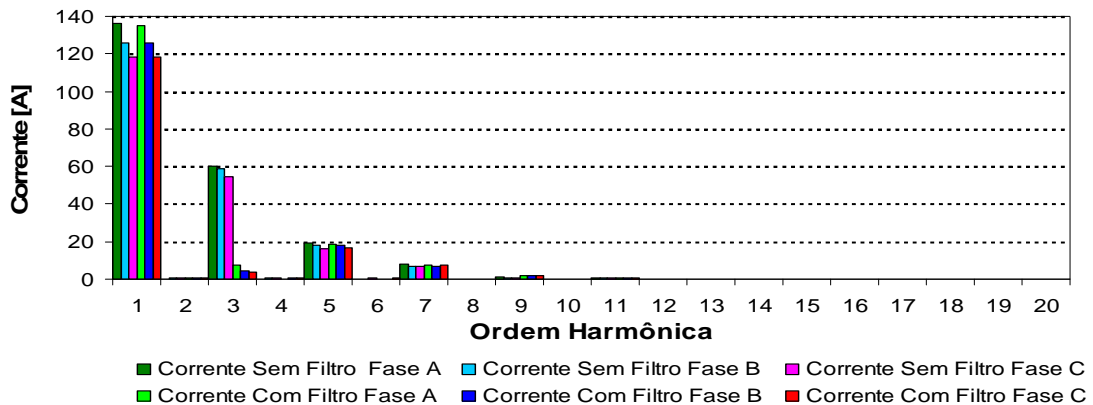


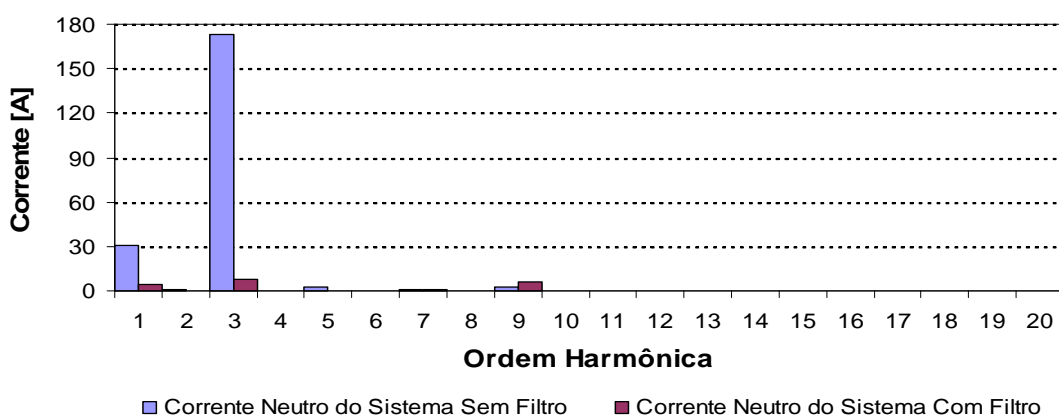
Figura 4.17 – a) Correntes de linha antes da conexão do banco de transformadores. b) Correntes de linha após a conexão do banco de transformadores.

Novamente para comparação entre os espectros harmônicos das correntes de linha antes e após a conexão do banco de transformadores no ponto de acoplamento é mostrada na figura (4.18).



*Figura 4.18 – Espectro harmônico das correntes de linha no local de acoplamento dos filtros, antes e após a conexão do banco de transformadores.*

Analogamente como o que ocorreu com as tensões, a figura (4.19) mostra o espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após a conexão do banco de transformadores. A redução significativa das correntes de sequência zero revela a eficiência deste tipo de equipamento no que tange à minimização de correntes de sequência zero no sistema em estudo.



*Figura 4.19 – Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após a conexão do banco de transformadores.*

Como se observa na figura (4.19) acima, todas as correntes de sequência zero foram atenuadas pelo acoplamento do banco de transformadores no local de acoplamento do filtro.

Por outro lado, a figura (4.20) mostra o que possa ser a maior desvantagem deste tipo de estrutura, que é o aumento que pode ocorrer em algumas componentes harmônicas, como é o caso da nona harmônica.

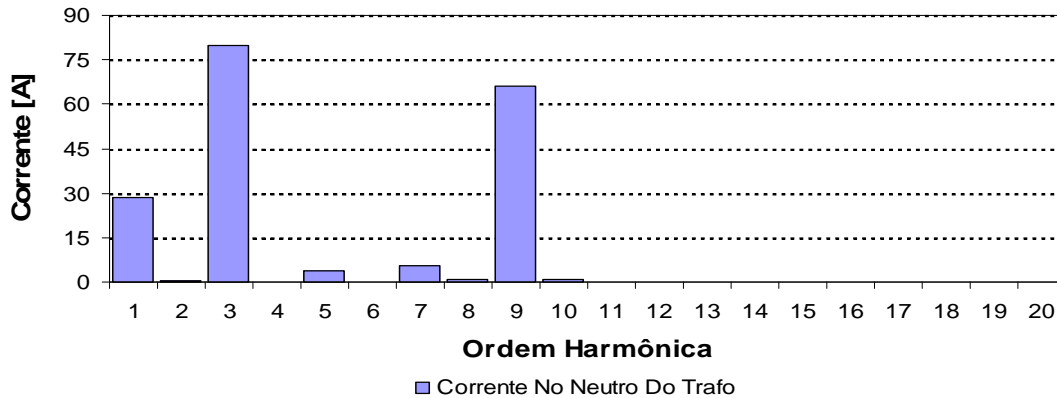


Figura 4.20 – Espectro harmônico da corrente de neutro do banco de transformadores após a conexão do banco de transformadores.

Este aumento se deve ao fato de o transformador em zig-zag oferecer um caminho de baixa impedância para todas correntes de sequência zero presentes no sistema. Com isso, se houverem tensões ou correntes de sequência zero no sistema, pelo transformador aparecerão correntes correspondentes à sequência considerada.

Adicionalmente, a figura (4.21) mostra comportamento da corrente *RMS* no neutro do transformador do alimentador antes a após a conexão do filtro.

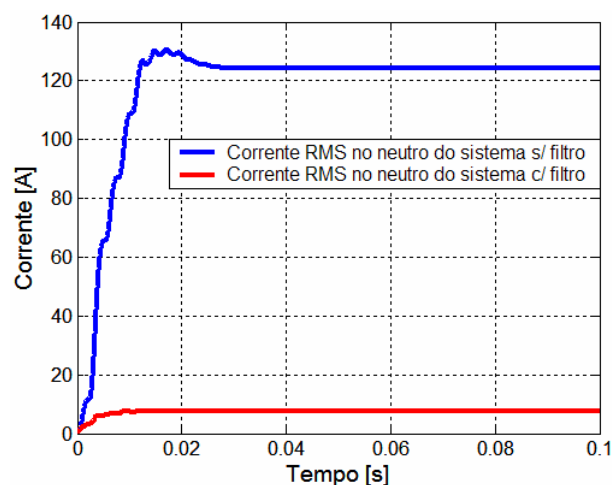


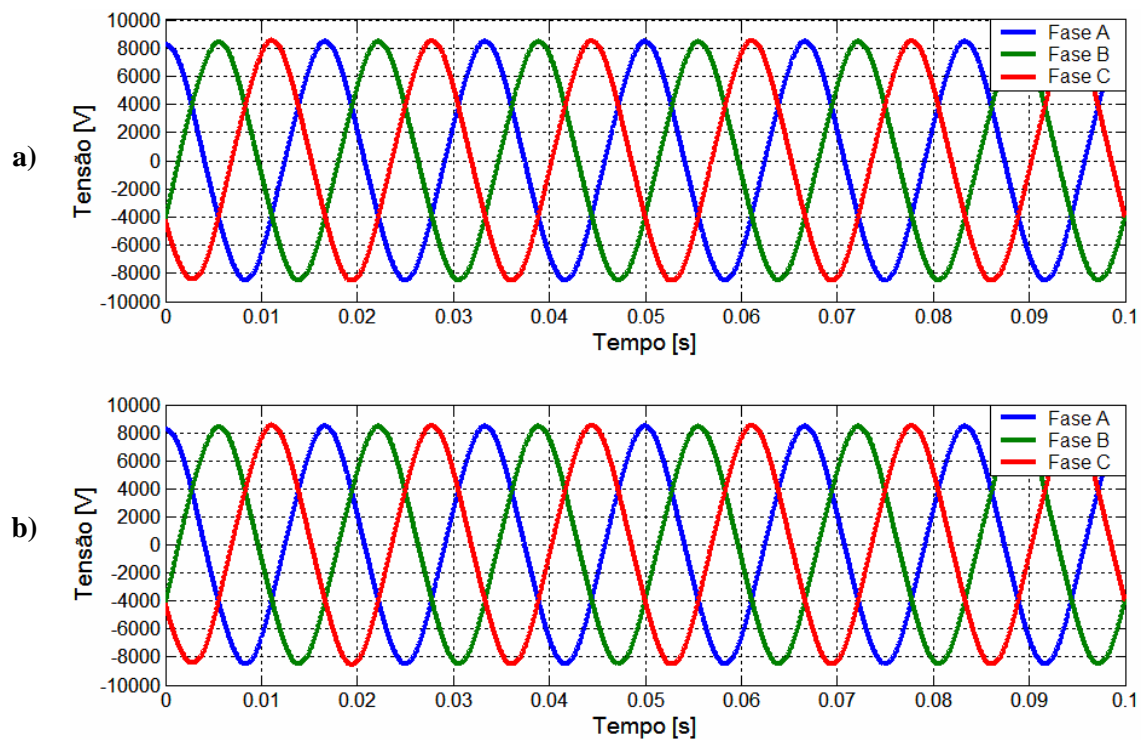
Figura 4.21 – Corrente *RMS* no neutro do transformador do alimentador.

A tabela (4.3) mostra como o fator de potência no local da instalação do filtro foi alterado com a conexão deste.

*Tabela 4.3 – Fator de potência, por fase, no local de acoplamento do filtro após a conexão deste.*

	Sem Filtro		Com Filtro	
	$\text{Cos}(\phi_1)$	$\frac{\cos \phi}{\sqrt{1+DTI^2}}$	$\text{Cos}(\phi_1)$	$\frac{\cos \phi}{\sqrt{1+DTI^2}}$
Fase A	0,9926	0,8995	0,98203	0,9699
Fase B	0,9712	0,8709	0,98172	0,9677
Fase C	0,9326	0,8398	0,94563	0,9339

A melhoria do fator de potência evidencia a eficiente atuação do banco de transformadores no que se refere à filtragem de correntes de sequência zero. Assim, as figuras (4.22) e (4.23) a seguir mostram, respectivamente, as formas de onda das tensões de fase e correntes de linha na saída do alimentador.



*Figura 4.22 – a) Tensões de fase do sistema antes da conexão do banco de transformadores. b) Tensões de fase após a conexão do banco de transformadores.*

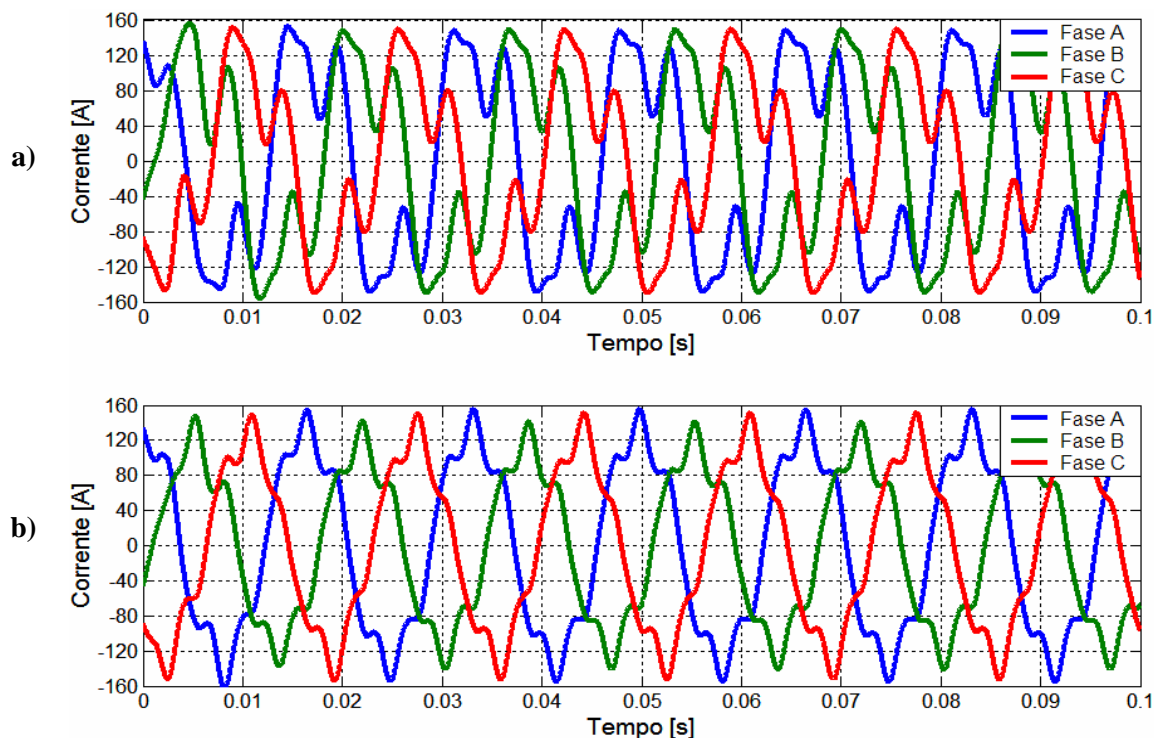


Figura 4.23 – a) Correntes de linha do sistema antes da conexão do banco de transformadores. b) Correntes de linha após a conexão do banco de transformadores.

Observa-se na figura (4.22) que praticamente não há diferenças entre as tensões na saída do alimentador antes e após a conexão do banco de transformadores. Contudo, o efeito da filtragem se faz presente, com maior ênfase, sobre as correntes de linha, mostradas na figura (4.23). A figura (4.24) mostra a comparação entre os espectros harmônicos das tensões de fase antes e após a conexão do banco de transformadores na saída do alimentador. A figura (4.25) analogamente apresenta as correntes de linha no mesmo local.



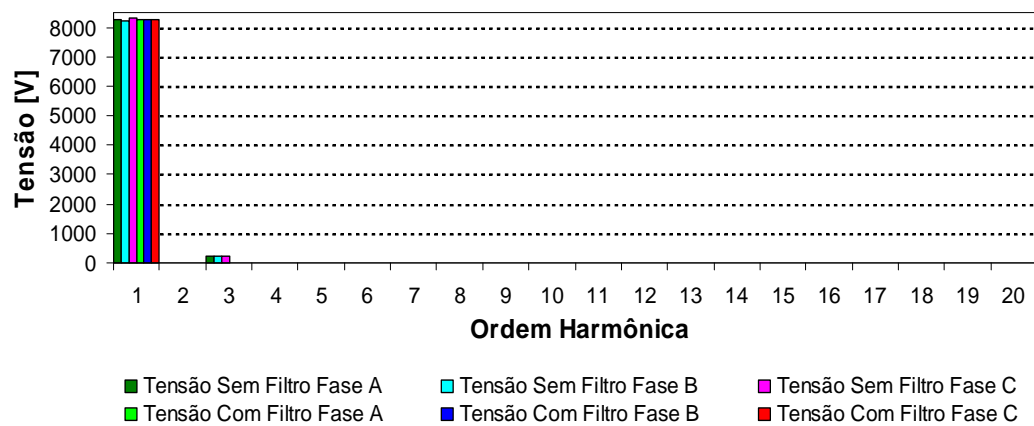


Figura 4.24 – Comparações entre os espectros harmônicos das tensões de fase antes e após a conexão do banco de transformadores.

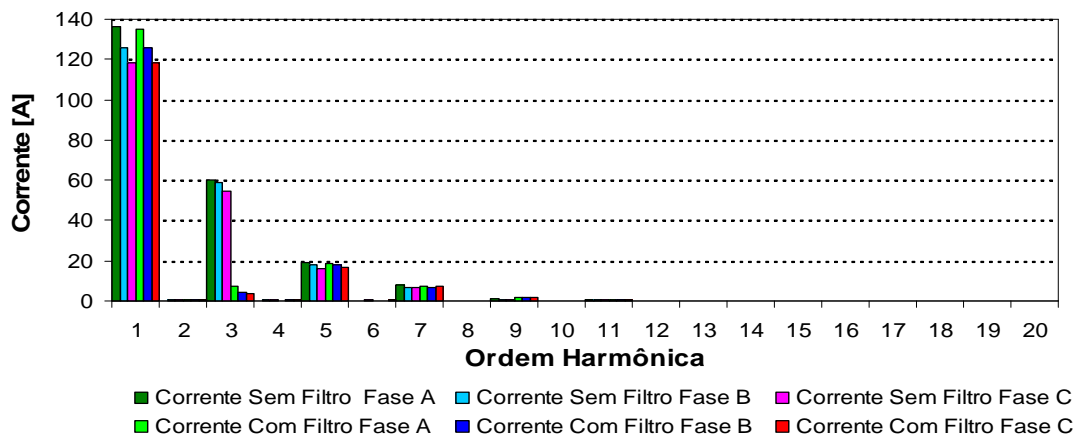


Figura 4.25 – Comparações entre os espectros harmônicos das correntes de linha antes e após a conexão do banco de transformadores.

A tabela (4.4) resume o comportamento do fator de potência no local de acoplamento dos filtros e na saída do alimentador antes e após o acoplamento do banco de transformadores ligados em zig-zag.

Dos resultados apresentados na tabela (4.4), pode-se dizer que o fator de potência serve como um indicador da qualidade da energia nas condições sem e com distorções harmônicas.

*Tabela 4.4 – Comportamento do fator de potência, por fase, antes e após a conexão do filtro no local de sua instalação e na saída do alimentador.*

	Ponto de Acoplamento dos Filtros				Saída do Alimentador			
	Sem Filtro		Com filtro		Sem filtro		Com filtro	
	$\cos(\phi_1)$	$\frac{\cos\phi}{\sqrt{1+DIT^2}}$	$\cos(\phi_1)$	$\frac{\cos\phi}{\sqrt{1+DIT^2}}$	$\cos(\phi_1)$	$\frac{\cos\phi}{\sqrt{1+DIT^2}}$	$\cos(\phi_1)$	$\frac{\cos\phi}{\sqrt{1+DIT^2}}$
Fase A	0,99267	0,8995	0,98203	0,9699	0,99934	0,9060	0,99461	0,9824
Fase B	0,97122	0,8709	0,98172	0,9697	0,98739	0,8859	0,99332	0,9797
Fase C	0,93264	0,8398	0,94563	0,9339	0,95802	0,8631	0,96936	0,9588

Um outro parâmetro indicador da qualidade da energia muito importante, em se tratando de tensões e correntes harmônicas, é a distorção harmônica total. Assim, a tabela (4.5) resume a variação dessa grandeza, tanto para as tensões de fase (*DTT*) e correntes de linha (*DTI*) do sistema antes e após a conexão do banco de transformadores.

*Tabela 4.5 – Comportamento da distorção harmônica total de tensão e corrente.*

	Local de Acoplamento do Filtro				Saída do Alimentador			
	Sem Filtro		Com filtro		Sem filtro		Com filtro	
	DTT%	DTI%	DTT%	DTI%	DTT%	DTI%	DTT%	DTI%
Fase A	14,421%	46,673%	6,542%	15,859%	2,9053%	46,536%	0,21951%	15,816%
Fase B	13,897%	49,35%	6,2076%	16,793%	2,9%	49,211%	0,21508%	16,741%
Fase C	12,902%	48,283%	5,8804%	14,883%	2,8675%	48,157%	0,21946%	14,846%

### 4.3.1 – COMENTÁRIOS GERAIS

As simulações mostraram que o método de filtragem utilizando um banco trifásico constituído de três unidades monofásicas interconectados em zig-zag é bastante eficiente para a filtragem de correntes de sequência zero em sistemas de distribuição a quatro fios.

Os resultados da simulação, em consonância com os resultados obtidos nas referências e no sistema teste utilizado, demonstram que, mediante um dimensionamento criterioso, levando-se em conta não somente os parâmetros elétricos, mas demais parâmetros inerentes à

sua construção física (custos), podem ser utilizados no alívio do transformador da subestação, no que diz respeito ao fluxo de correntes de sequência zero em seu neutro.

Por fim, conforme explorado nas simulações, a maior desvantagem observada para esta opção de filtro é a possível amplificação que pode ocorrer em determinadas correntes de sequência zero presentes no sistema.

#### **4.4 – AVALIAÇÃO DO FILTRO TIPO 2**

A estrutura do tipo 2, descrita com detalhes no Capítulo III desta dissertação, teve aqui os valores de seus elementos indutor e capacitor dimensionados de acordo com os resultados obtidos na simulação do sistema teste modelado, para obtenção de resultados mais expressivos, conforme realizado na seção 4.3 anterior. Foram observados nas análises da seção anterior, duas localizações, que serão utilizados ao longo deste capítulo, quais sejam: o primeiro é o local de acoplamento dos filtros com o sistema; e o segundo local é a saída do alimentador.

A tabela (4.6) resume as informações dos parâmetros dos elementos L e C, por fase, utilizados na simulação.

---

*Tabela 4.6 – Parâmetros LC do filtro utilizados na modelagem dos filtros em série.*

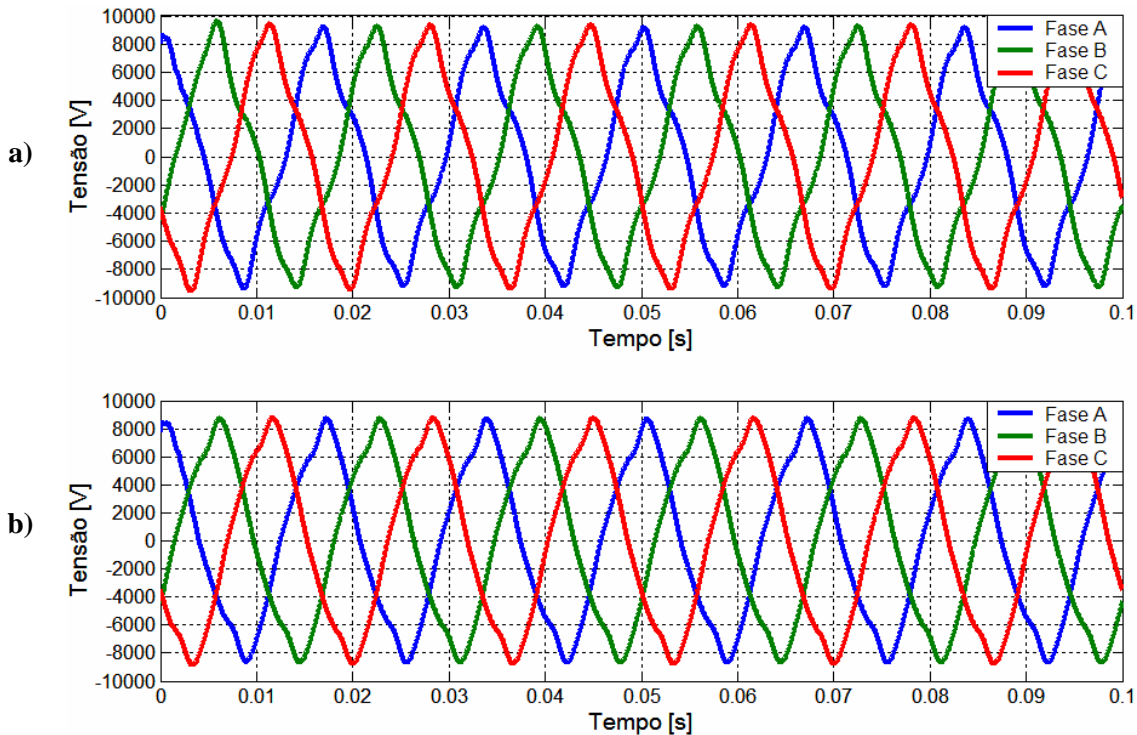
---

Indutor (H)	8,5912
Capacitor ( $\mu$ F)	0,819
Resistência ( $\Omega$ )	0,2
Fator de qualidade (Q)	60

---

Os resultados da simulação, em consonância com os resultados extraídos das referências utilizadas, podem ser vistos nas figuras a seguir. Assim, a figura (4.26) mostra as formas de onda das tensões de fase no ponto de acoplamento antes e após a conexão do filtro.

Como se observa, a distorção harmônica de tensão sofreu pouca alteração com a atuação do filtro. Isto se deve ao fato de que, devido à queda de tensão harmônica sobre a impedância harmônica do filtro, o sinal de tensão manteve-se aos níveis anteriores, ou seja, sem a presença do filtro.



*Figura 4.26 – a) Tensões de fase do sistema antes da conexão dos filtros em série sintonizado na frequência fundamental. b) Tensões de fase após a conexão dos filtros em série sintonizado na frequência fundamental.*

Os espectros harmônicos das tensões de fase antes e após o acoplamento do filtro em série sintonizado na fundamental são apresentados na figura (4.27) de forma a fornecer uma comparação entre as condições operativas sem e com o filtro.

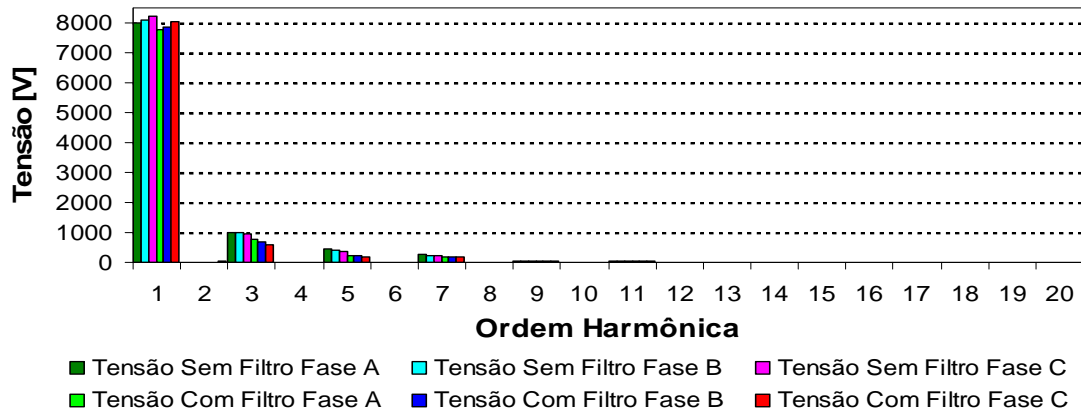


Figura 4.27 – Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de fase sem e com a presença dos filtros em série.

A figura (4.28) mostra as correntes de linha antes e após o acoplamento dos filtros em série no local de acoplamento dos filtros.

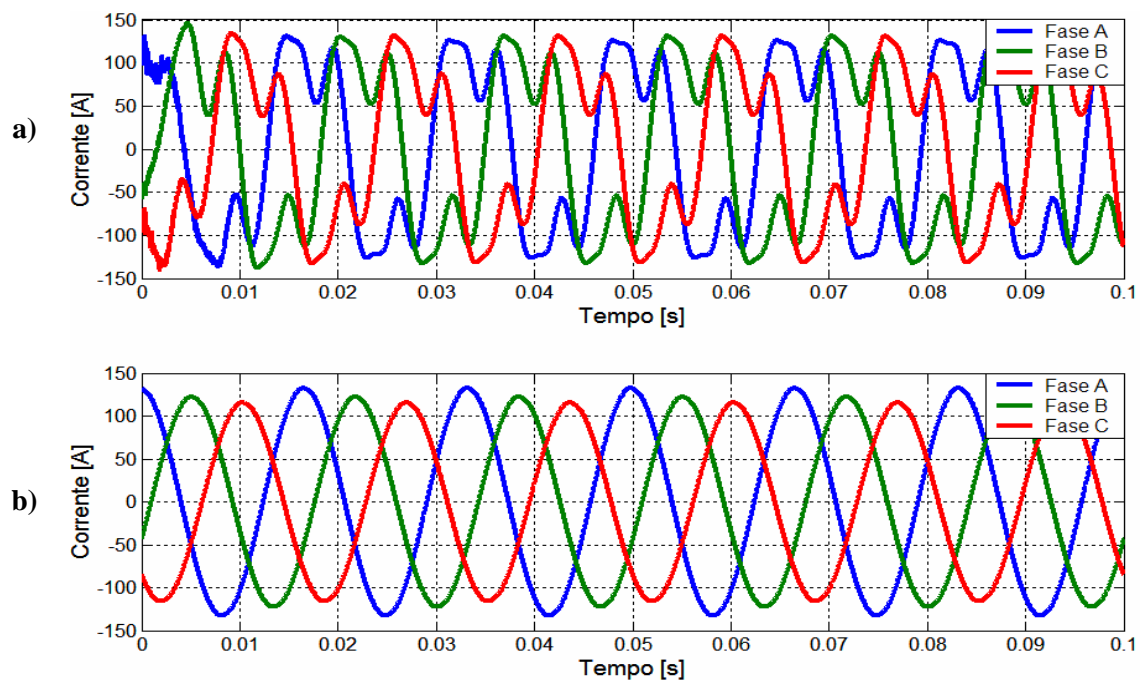


Figura 4.28 – a) Correntes de linha antes do acoplamento dos filtros em série. b) Correntes de linha após o acoplamento o acoplamento dos filtros em série.

Na figura (4.29) tem-se uma comparação dos espectros harmônicos das correntes de linha do sistema antes e após a conexão do filtro no local de acoplamento do filtro.

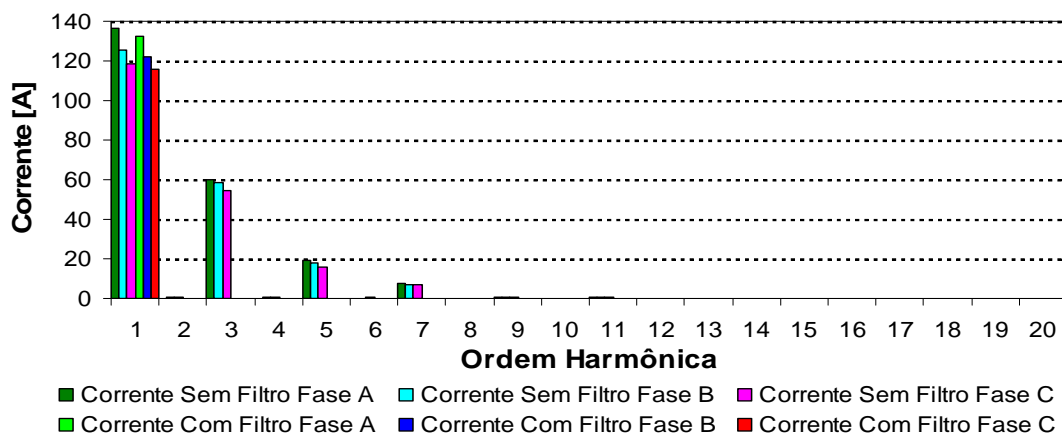


Figura 4.29 – Espectros harmônicos das correntes de linha no local de acoplamento dos filtros, antes e após a conexão do filtro em série.

A figura (4.30) mostra o espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após a conexão dos filtros em série. Observa-se a redução drástica de todas as correntes harmônicas revela a eficiência deste tipo de equipamento no que tange à minimização destas correntes no sistema em estudo.

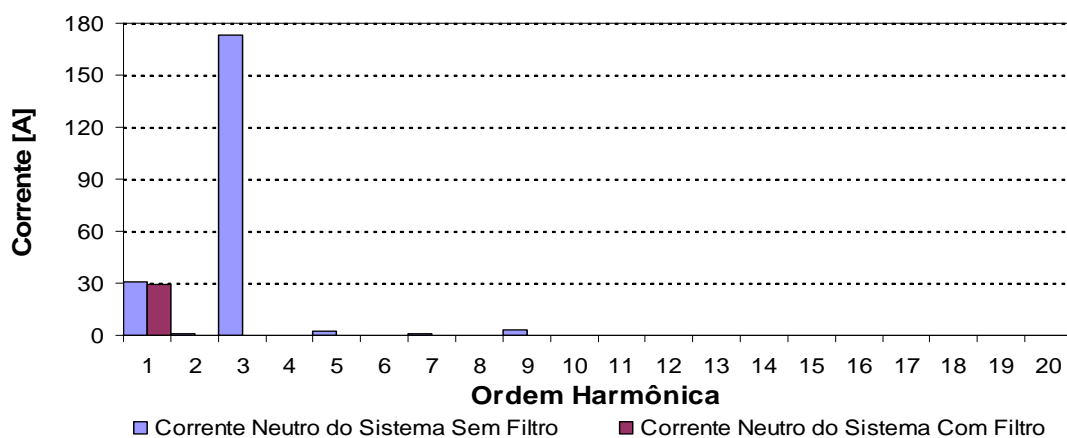
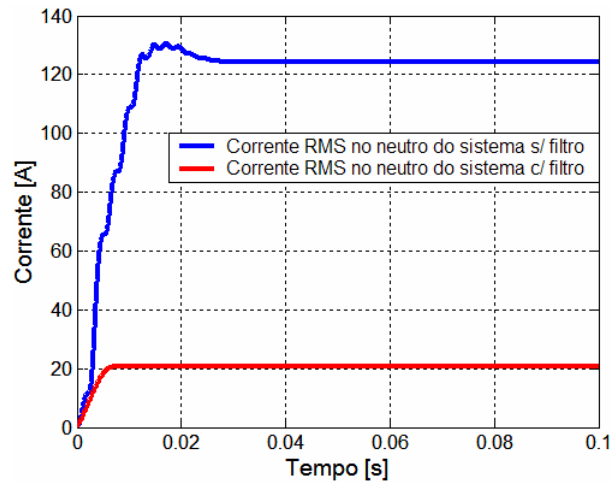


Figura 4.30 – Espectro harmônico das correntes de neutro do sistema antes e após o acoplamento dos filtros em série.

Uma diminuição muito discreta pode ser observada na frequência fundamental, sendo esta ocasionada pela discreta impedância apresentada pelos filtros à frequência fundamental.

Já a figura (4.31) apresenta o comportamento da corrente *RMS* no neutro do transformador do alimentador antes a após o acoplamento do filtro.



*Figura 4.31 – Corrente RMS no neutro do transformador do alimentador sem e com a conexão do filtro.*

Prosseguindo, a tabela (4.7) mostra como o fator de potência no local da instalação comporta-se com o acoplamento dos filtros.

*Tabela 4.7 – Fator de potência, por fase, no local de acoplamento do filtro antes e após conexão deste.*

	Sem Filtros		Com Filtros	
	$\text{Cos}(\phi_1)$	$\frac{\cos \phi}{\sqrt{1 + DTI^2}}$	$\text{Cos}(\phi_1)$	$\frac{\cos \phi}{\sqrt{1 + DTI^2}}$
Fase A	0,9926	0,8995	0,9926	0,9926
Fase B	0,9712	0,8709	0,9713	0,9713
Fase C	0,9326	0,8398	0,9325	0,9325

Desta tabela, observa-se as proximidades entre o fator de potência com e sem distorção harmônica, evidenciando que as distorções harmônicas de tensão e corrente foram minimizadas com a atuação dos filtros em série. Na sequência, as figuras (4.32) e (4.33) a seguir mostram, respectivamente, as formas de onda das tensões de fase e correntes de linha na saída do alimentador. É possível observar na figura (4.32) que praticamente não existe diferença entre as tensões na saída do alimentador antes e após o acoplamento dos filtros. Contudo, o efeito dos filtros se faz presente com maior ênfase sobre as correntes de linha, mostradas na figura (4.33) a seguir.

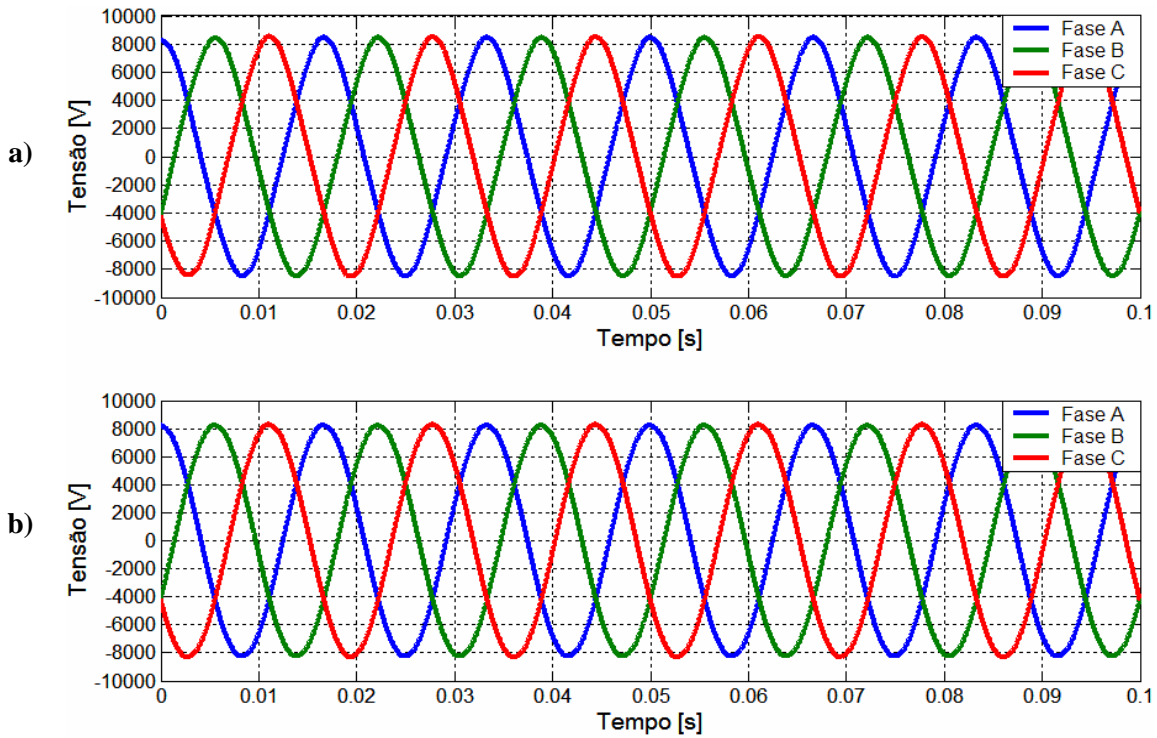


Figura 4.32 – a) Tensões de fase do sistema antes da conexão dos filtros. b) Tensões de fase após a conexão dos filtros.

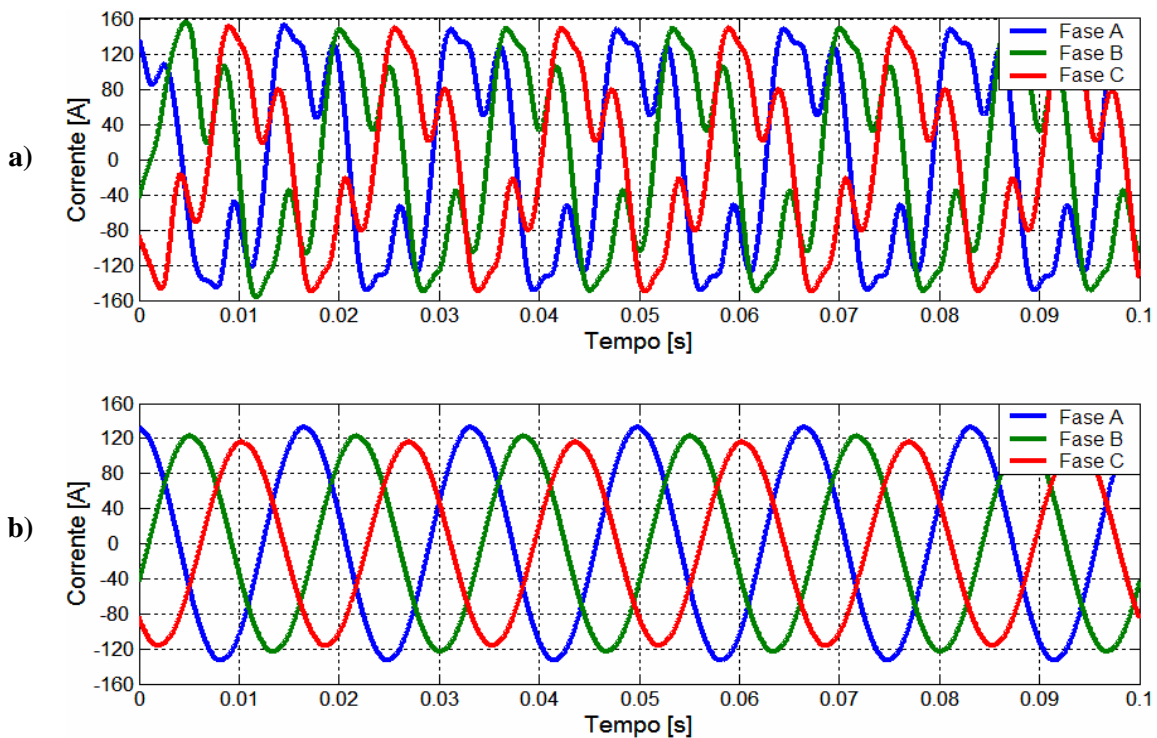
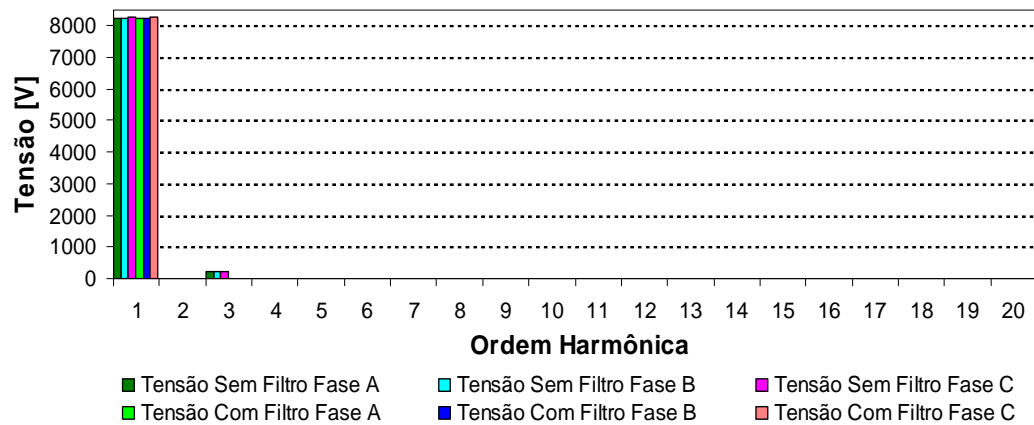


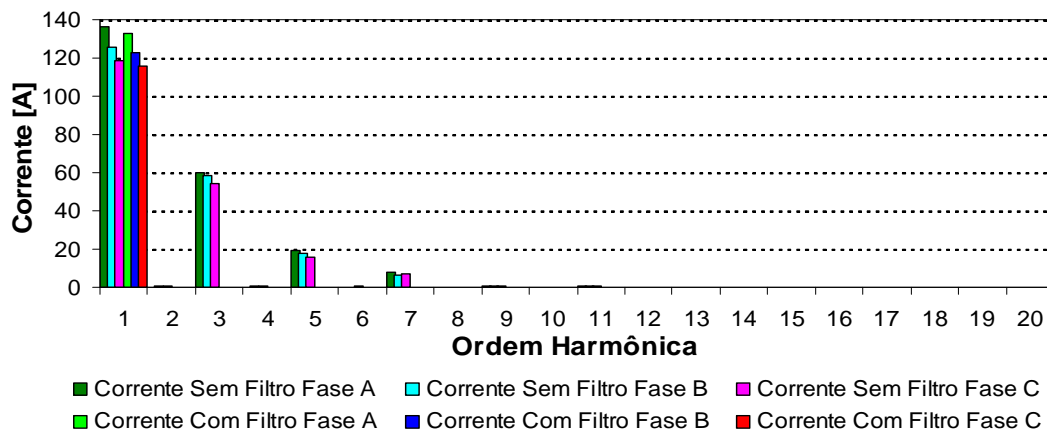
Figura 4.33 – a) Correntes de linha do sistema antes da conexão dos filtros. b) Correntes de linha após a conexão dos filtros.



Observa-se na figura (4.34) a comparação do espectro harmônico das tensões de fase antes e após a conexão dos filtros série na saída do alimentador. Analogamente, a figura (4.35) mostra a comparação para as correntes de linha no mesmo local do sistema.



*Figura 4.34 – Comparações entre os espectros harmônicos das tensões de fase na saída do alimentador sem e com a presença do filtro.*



*Figura 4.35 – Comparação entre os espectros harmônicos das correntes de linha na saída do alimentador sem e com a presença dos filtros.*

A tabela (4.8) resume o comportamento do fator de potência no local de acoplamento do filtros e na saída do alimentador antes e após a conexão do filtro.

*Tabela 4.8 – Comportamento do fator de potência, por faz, antes e após a conexão do filtro.*

	Ponto de Acoplamento dos Filtros				Saída do Alimentador			
	Sem Filtro		Com filtro		Sem filtro		Com filtro	
	$\text{Cos}(\phi_1)$	$\frac{\cos\phi}{\sqrt{1+DII^2}}$	$\text{Cos}(\phi_1)$	$\frac{\cos\phi}{\sqrt{1+DII^2}}$	$\text{Cos}(\phi_1)$	$\frac{\cos\phi}{\sqrt{1+DII^2}}$	$\text{Cos}(\phi_1)$	$\frac{\cos\phi}{\sqrt{1+DII^2}}$
Fase A	0,99267	0,8995	0,9926	0,9926	0,99934	0,9060	0,9991	0,9991
Fase B	0,97122	0,8709	0,9713	0,9713	0,98739	0,8859	0,9890	0,9890
Fase C	0,93264	0,8398	0,9325	0,9325	0,95802	0,8631	0,9603	0,9603

Observando o comportamento do fator de potência mostrado na tabela (4.8) acima, é possível dizer que o fator de potência pode ser utilizado como um indicador da qualidade da energia no âmbito das distorções harmônicas.

Um outro indicador importante em se tratando de tensões e correntes harmônicas é a distorção harmônica total. Neste particular, a tabela (4.9) resume a variação destas grandezas, tanto para as tensões de fase (*DTT*) como para correntes de linha (*DTI*) do sistema antes e após a conexão do filtro.

*Tabela 4.9 – Comportamento da distorção harmônica total de tensão e corrente, por fase.*

	Ponto de Acoplamento dos Filtros				Saída do Alimentador			
	Sem Filtro		Com filtro		Sem filtro		Com filtro	
	DTT%	DTI%	DTT%	DTI%	DTT%	DTI%	DTT%	DTI%
Fase A	14,421%	46,673%	10,5%	0,08%	2,9053%	46,536%	0,028%	0,08%
Fase B	13,897%	49,35%	9,56%	0,09%	2,9%	49,211%	0,067%	0,09%
Fase C	12,902%	48,283%	8,12%	0,07%	2,8675%	48,157%	0,065%	0,07%

#### **4.4.1 – COMENTÁRIOS GERAIS**

As simulações deste tipo de filtro avaliado neste etapa dos trabalhos mostraram que este método é eficiente, no que tange à minimização de correntes harmônicas circulantes nas fases do sistema e no neutro deste. Verificou-se que, a corrente que circula no neutro do

sistema é constituída pela corrente fundamental, originada pelo desequilíbrio das cargas no sistema somadas às componentes harmônicas de seqüência zero. A minimização destas correntes harmônicas circulantes no neutro, neste caso, é obtida usando-se o princípio da ressonância série. O filtro assim determinado, foi sintonizado na freqüência fundamental (60 Hz), oferecendo assim alta impedância equivalente à passagem das demais correntes. Devido a esta impedância equivalente é que surge a maior desvantagem desta topologia, gerando uma queda de tensão harmônica sobre a impedância harmônica dos filtros. Isto pode ser verificado através da figura (4.26) que mostra após o acoplamento do filtro, a distorção harmônica de tensão se manteve presente. De acordo então com os resultados obtidos nas simulações, e em concordância com as medições, pode-se dizer que o método pode ser usado em sistemas que não apresentem altos níveis de distorção harmônica de corrente, de modo a não provocar quedas de tensões harmônicas significativas.

## **4.5 – AVALIAÇÃO DO FILTRO TIPO 3**

Este tipo de filtro cuja modelagem baseou-se no princípio da ressonância série, teve seu dimensionamento desenvolvido no CAPÍTULO III (figura 3.22). As avaliações desenvolvidas aqui seguem nos mesmos padrões desenvolvidos nos filtros anteriores. Os tipos de filtros foram modelados objetivando verificar os desempenhos destes no sistema de distribuição em estudo. A primeira etapa do filtro tipo 3, se refere ao de 3ª ordem, com o objetivo de minimizar o fluxo de correntes de seqüência zero no neutro do transformador da subestação. A segunda etapa do filtro tipo 3 é constituído de dois outros filtros modelados para 5ª e 7ª ordens, tendo como objetivos adequar aos níveis limites de tensão e corrente

harmônicas da norma *IEEE* 519-1992, que está resumida nas tabelas (4.10) para tensões e na tabela (4.11) para correntes, a seguir.

*Tabela 4.10 – Limites de distorção harmônica de tensão, em porcentagem, em relação à tensão à frequência fundamental*

Tensão nominal no local de acoplamento comum (PAC) kV	Distorção harmônica de tensão individual (%)	Distorção harmônica total de tensão, DTT (%)
$V_n \leq 69$	3,0	5,0
$69 < V_n \leq 161$	1,5	2,5
$V_n > 161$	1,0	1,5

Fonte: Norma *IEEE* 519-1992, Tabela 11.1

*Tabela 4.11 – Limites de distorção harmônica de corrente ( $I_h$ ) em porcentagem de  $I_L$ .*

$V_n \leq 69kV$						
$I_{SC} / I_L$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	DTI
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Fonte: Norma *IEEE* 519-1992, Tabela 10.3

Procedendo de forma semelhante à seção anterior, dois locais distintos no sistema teste foram verificados: o primeiro no local de acoplamento dos filtros com o sistema; e o segundo na saída do alimentador. Os filtros de 3ª ordem foram modelados de forma a prover a potência reativa necessária à correção do fator de potência. A potência de cada braço do filtro é de 300 kVar, o que resultou em uma capacitância de  $12,53 \mu F$  por fase. A indutância do reator do filtro é de 66,74 mH e a resistência de  $1,85 \Omega$ . Os filtros de 5ª foram modelados de forma que as correntes de mesma ordem pudessem ser absorvidas por ele. Desta forma, o filtro é constituído por um banco de capacitores de 200 kVar, em delta, por fase, em conjunto com um indutor de 35,79 mH e uma resistência de  $1,3 \Omega$ . O filtro de 7ª apresenta os valores

dispostos na tabela (4.12), conjuntamente com os valores utilizados na simulação dos filtros utilizados para este caso.

---

*Tabela 4.12 – Resumo dos parâmetros dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens modelados.*

---

	3ª	5ª	7ª
Capacitor ( $\mu$ F)	12,53	2,78 (em Delta)	1,39 (em Delta)
Reator (mH)	66,74	35,79	35,88
Resistência ( $\Omega$ )	1,85	1,3	2,3
Frequência de sintonia (n)	2,85	4,85	6,85
Fator de Qualidade (Q)	40	40	40

Os resultados da simulação mostraram-se consoantes com os resultados das referências utilizadas, sendo que as figuras a seguir mostram os resultados da simulação da topologia avaliada. Assim, a figura (4.36) mostra as formas de onda das tensões de fase no local de acoplamento antes e após a conexão dos filtros de 3ª ordem. Pode-se observar que não houve uma melhoria significativa no nível de distorção harmônica de tensão, que antes da conexão dos filtros era de 14,42%, 13,89% e 12,9% para as fases A, B e C, respectivamente e, após o acoplamento dos filtros de 3ª ordem assumiram valores da ordem de 13,63%, 12,11% e 10,68% para as fases A, B e C, respectivamente. A manutenção destes valores se deve ao fato de o sistema apresentar um aumento de algumas tensões harmônicas após conexão dos filtros de 3ª ordem, principalmente as tensões de 5ª e 7ª ordens. Com o objetivo de minimizar o fluxo de correntes harmônicas de 5ª e 7ª ordens, filtros sintonizados nas referidas frequências foram acoplados no mesmo local de acoplamento dos filtros de 3ª ordem. Assim, a figura (4.37) mostra a influência destes filtros nas tensões de fase.

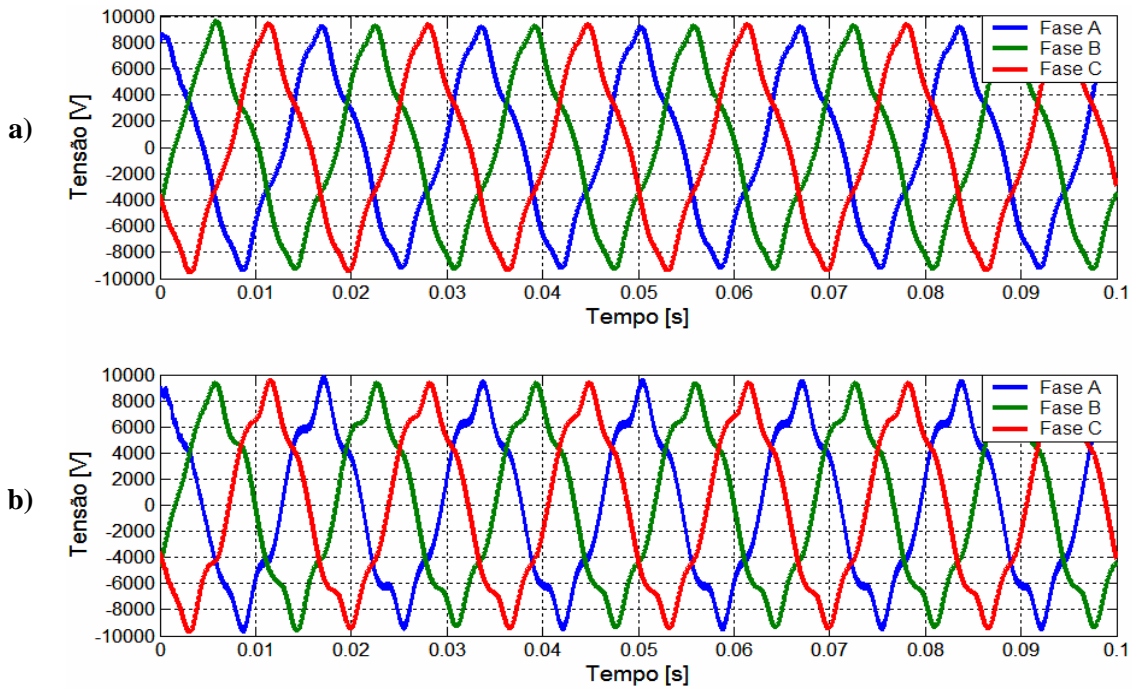


Figura 4.36 – a) Tensões de fase do sistema antes do acoplamento dos filtros de 3ª ordem. b) Tensões de fase após o acoplamento dos filtros de 3ª ordem.

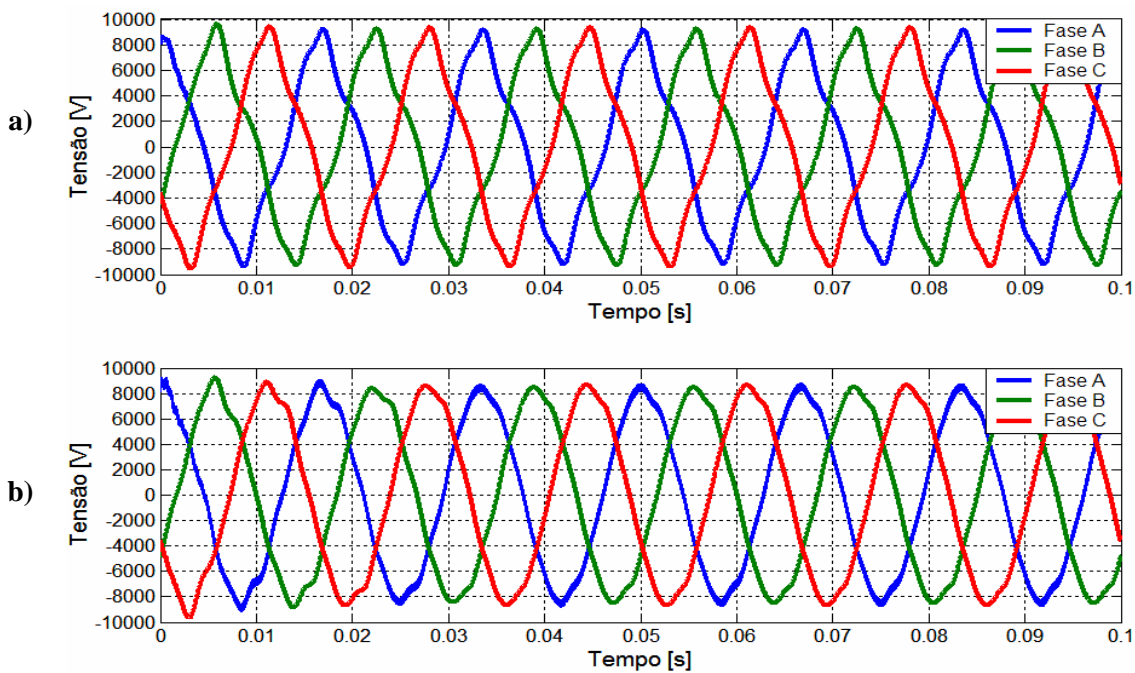
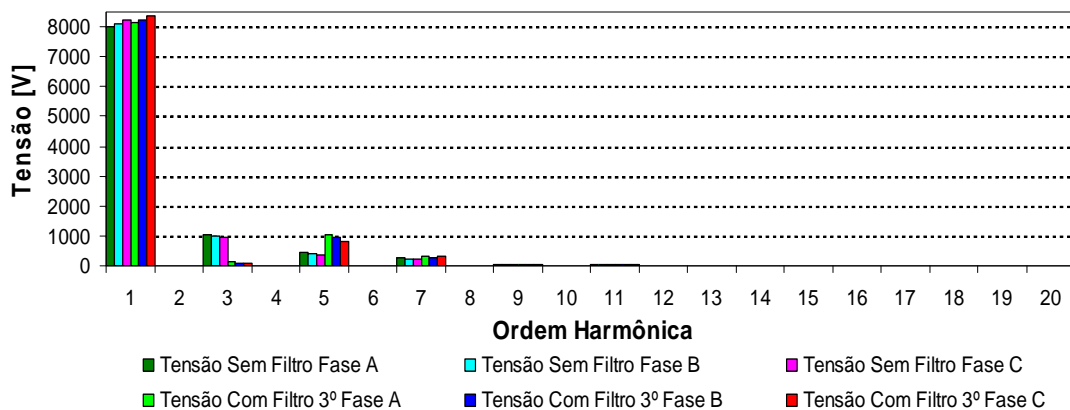


Figura 4.37 – a) Tensões de fase do sistema antes do acoplamento dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens. b) Tensões de fase após o acoplamento dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens.

Com o acoplamento dos filtros de 3ª e 5ª ordens, as distorções harmônicas das tensões de fase atingiram valores de 5,55%, 4,84% e 4,97%, nas fases A, B e C respectivamente. Já

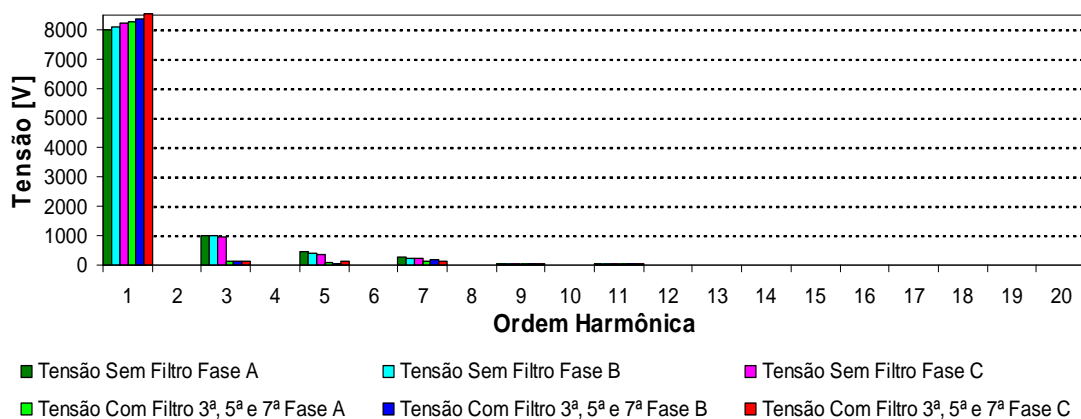
com acoplamento dos filtros de 7ª ordem, as distorções harmônicas das tensões de fase, no ponto de acoplamento assumiram valores de 2,83%, 2,68% e 2,54% para as fases A, B e C, respectivamente.

Os espectros harmônicos das tensões de fase antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª são mostrados na figura (4.38) de forma a fornecer uma comparação entre as duas condições de operação do sistema.



*Figura 4.38 – Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de fase sem e com a presença dos filtros de 3ª ordem.*

A seguir, a figura (4.39) mostra os espectros harmônicos das tensões de fase sem e com o acoplamento dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens, no local de acoplamento dos filtros.



*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.*

A atuação dos filtros sintonizados na 3ª harmônica fica clara através da figura (4.38), onde é observa-se que a componente harmônica de 3ª ordem foi sensivelmente minimizada. Porém, verifica-se que há um aumento nas componentes de 5ª e 7ª ordens. Tal aumento é justificável devido ao fato de o filtro em questão representar uma impedância para a 5ª ordem de, aproximadamente 83,48  $\Omega$  e 145,89  $\Omega$  para a 7ª ordem, ou seja, fornece um caminho para o fluxo de correntes de 5ª e 7ª ordens através dos filtros em questão, aumentando a corrente e, conseqüentemente a queda de tensão na impedância série do sistema. Assim, a figura (4.40) mostra a variação da impedância dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª com a frequência.

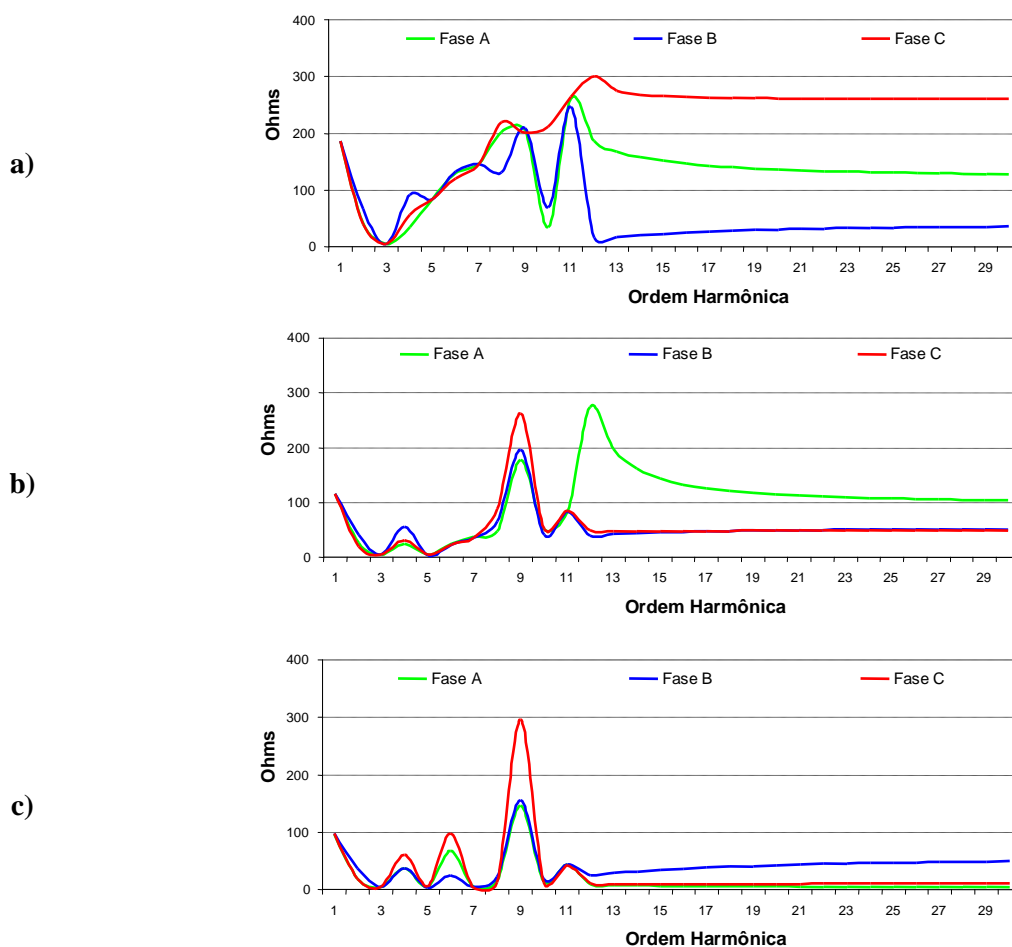


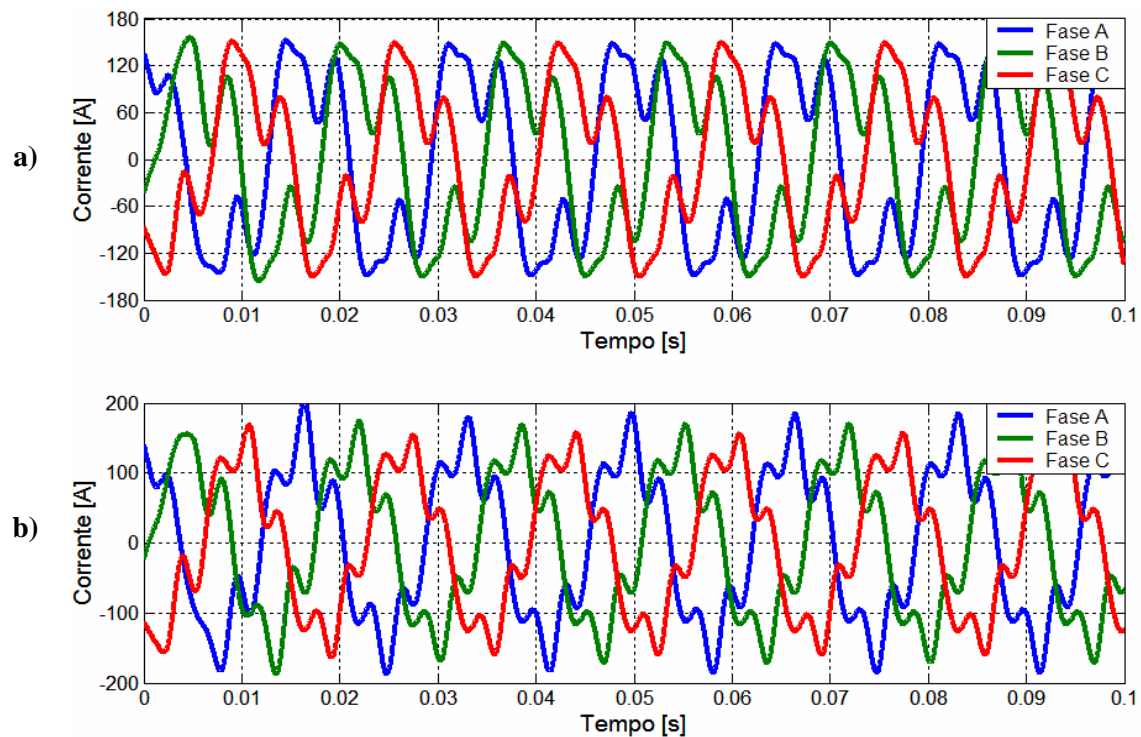
Figura 4.40 – Variação da impedância dos filtros com a frequência. a) Interação da impedância harmônica do filtro de 3ª ordem com o sistema; b) Interação da impedância harmônica dos filtros de 3ª e 5ª ordens com o sistema; c) Interação da impedância harmônica do filtro de 3ª, 5ª e 7ª ordens com o sistema.

Na figura (4.40) acima observa-se que, com a configuração final, ou seja, com os 3 filtros conectados ao sistema, há a ocorrência de ressonâncias tanto paralelas (nas frequências de, aproximadamente, 240 Hz, 360 Hz, 540Hz, e 660 Hz), e ressonância série nas frequências



de sintonia dos filtros e na frequência de 600 HZ. Tais ressonâncias não oferecem problemas ao funcionamento do sistema, devido à não geração de correntes harmônicas nas frequência de ressonância paralela.

A figura (4.41) mostra as correntes de linha antes e após a conexão do filtro de 3ª ordem. Observa-se que após a conexão deste filtro, as correntes do sistema se tornaram mais próximas da forma senoidal, em relação às correntes sem o filtro, na figura (4.41a). Contudo pode-se observar que, as componentes de 5ª e 7ª ordens apresentam-se um pouco elevadas. Tal fato se deve à variação da impedância do filtro, mostrada na figura (3.40). Por fim, a figura (3.42) mostra a atuação dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens operando em conjunto, e na figura (4.43) é possível avaliar fazendo-se a comparação entre o espectro harmônico das correntes de linha do sistema antes e após o acoplamento dos filtros no ponto de acoplamento dos filtros.



*Figura 4.41 –a) Correntes de linha antes do acoplamento dos filtros de 3ª ordem. b) Correntes de linha após o acoplamento dos filtros de 3ª ordem.*

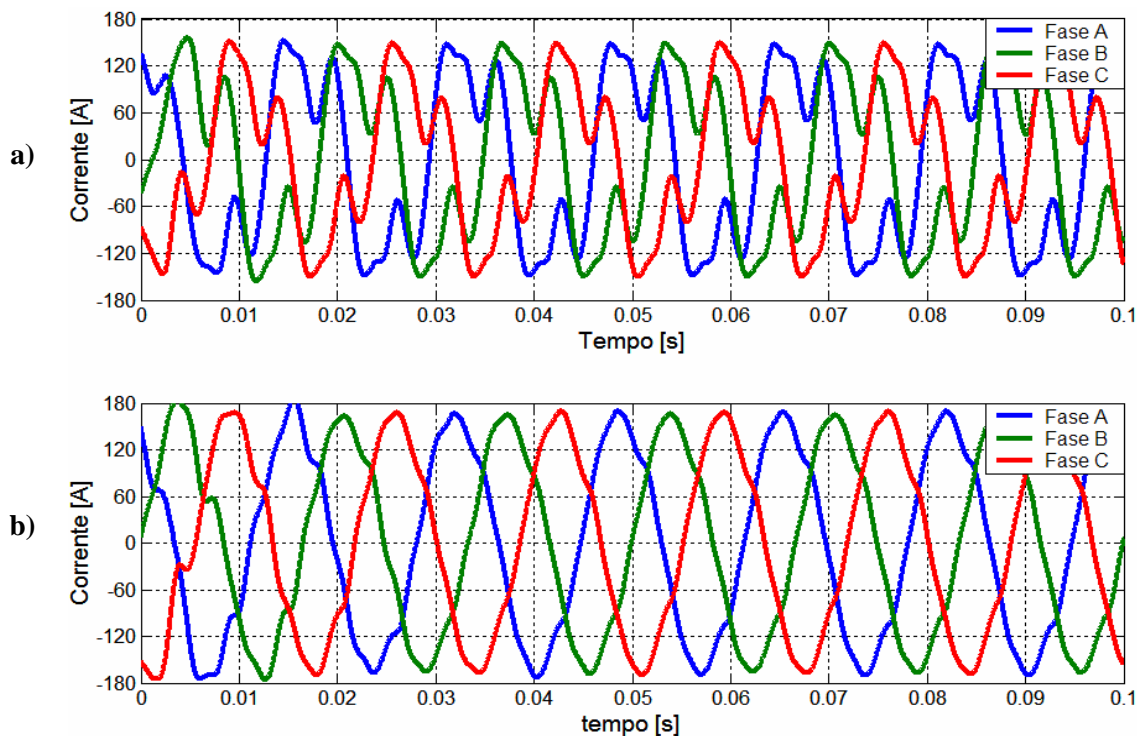


Figura 4.42 –a) Correntes de linha do sistema a) antes da conexão dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens. b) Correntes de linha do sistema após a conexão dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens.

É possível observar na figura 4.42, que as correntes de linha, após a conexão dos filtros no sistema, tiveram a sua forma mais aproximada à forma de uma senóide. Com os filtros, as distorções harmônicas de corrente que, antes do acoplamento dos filtros eram de 46,67%, 49,35% e 48,28% nas fases A, B e C, respectivamente, com a atuação dos filtros de 3ª ordem, tais distorções atingiram os valores de 29,00%, 28,03% e 25,67%, nas fases A, B e C, respectivamente. A atuação conjunta dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens possibilitou que as distorções harmônicas de corrente atingissem, nas fases A, B e C, os valores de 6,22%, 5,84% e 5,57%, respectivamente.

Já na figura (4.43) observa-se a comparação entre os espectros harmônicos das correntes de linha do sistema antes e após o acoplamento do filtro de 3ª ordem no local de acoplamento do filtro.

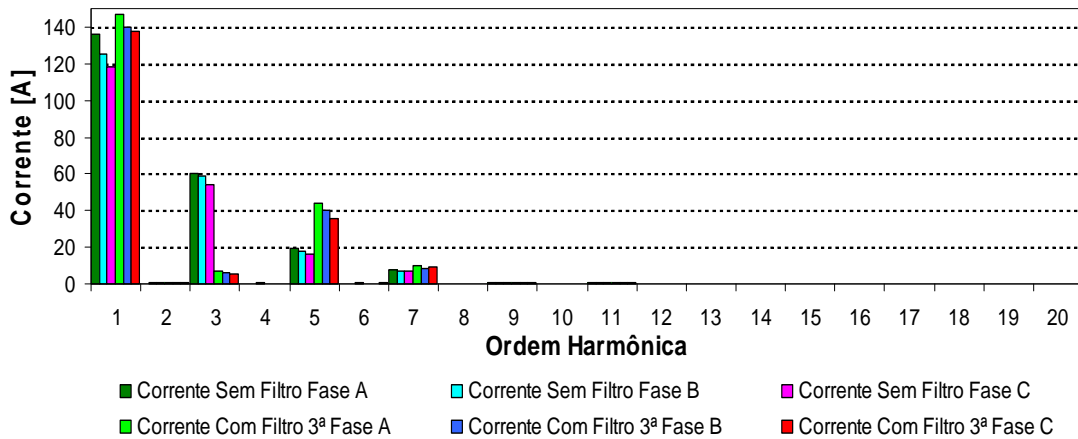


Figura 4.43 – Espectro harmônico das correntes de linha no ponto de acoplamento dos filtros, antes e após a conexão dos filtros de 3ª ordem.

Na figura (4.44) é mostrada a comparação entre os espectros harmônicos das correntes de linha antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens operando conjuntamente. Observa-se desta que, as correntes tiveram seu conteúdo harmônico fortemente reduzido, evidenciando a eficiência no processo de filtragem das correntes harmônicas.

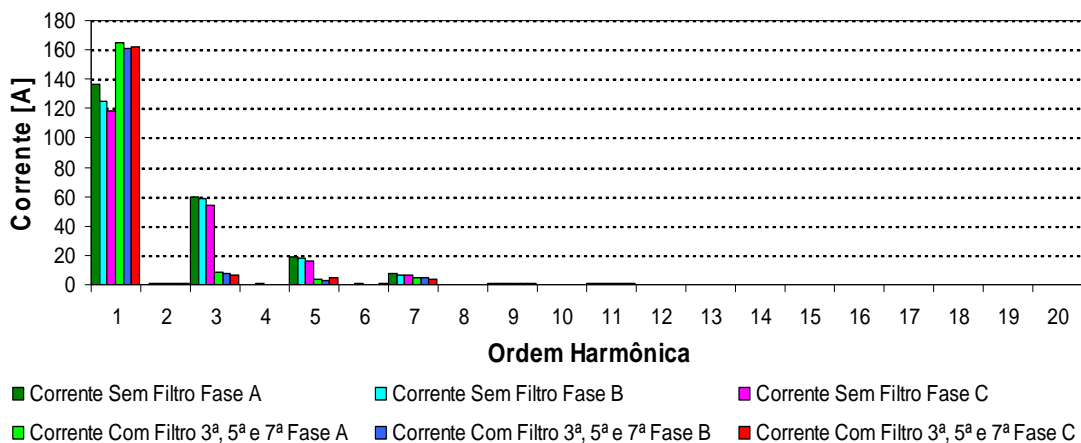


Figura 4.44 – Espectro harmônico das correntes de linha no ponto de acoplamento dos filtros, antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens.

A sensível diminuição as correntes de 3ª ordem revela a eficiência deste tipo de equipamento em sua função de filtro harmônico.

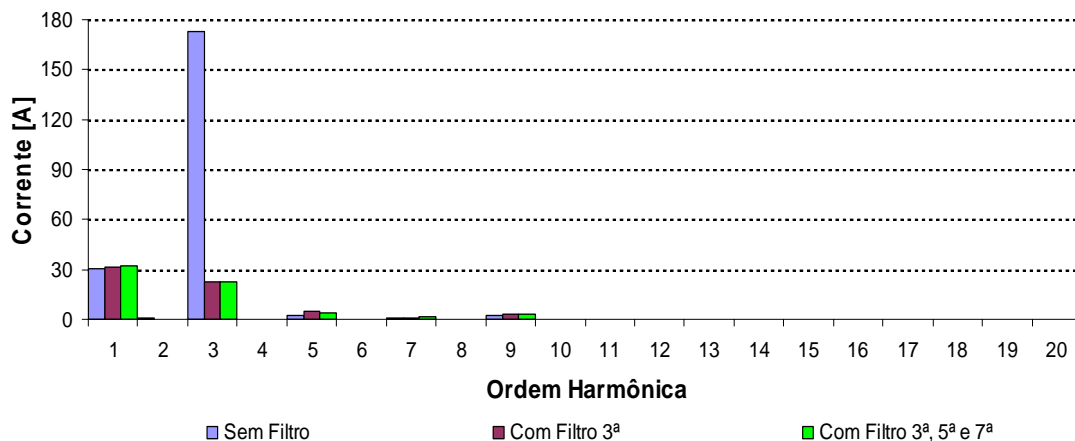


Figura 4.45 – Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens.

É possível observar, na figura (4.45) acima, que as correntes de 3ª ordem sofreram significativas reduções com o acoplamento do filtro de 3ª ordem. Entretanto, o acoplamento do filtro de 5ª não teve influência significativa sobre as correntes no neutro. A figura (4.46) apresenta o comportamento da corrente *RMS* no neutro do transformador do alimentador antes e após a conexão dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens.

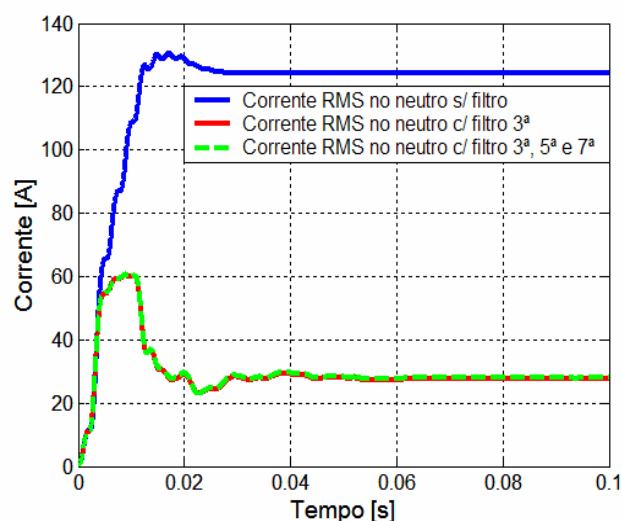


Figura 4.46 – Corrente *RMS* no neutro do transformador do alimentador.

A tabela (4.13) mostra analogamente aos casos anteriores, como o fator de potência no ponto da instalação foi alterado com o acoplamento do filtro de 3ª ordem

*Tabela 4.13 – Fator de potência, por fase, no ponto de acoplamento dos filtros após o acoplamento do filtro de 3ª ordem.*

	Sem Filtro		Com Filtro	
	$\text{Cos}(\phi_1)$	$\frac{\cos \phi}{\sqrt{1+DTI^2}}$	$\text{Cos}(\phi_1)$	$\frac{\cos \phi}{\sqrt{1+DTI^2}}$
Fase A	0,99267	0,8995	0,9389*	0,8970*
Fase B	0,97122	0,8709	0,8876*	0,8512*
Fase C	0,93264	0,8398	0,8214*	0,7934*

*(\*) – Fator de potência capacitivo.*

A proximidade entre o fator de potência com e sem distorções evidencia que, os sinais de tensão e corrente estão com os seus respectivos conteúdos harmônicos minimizados, pela ação do filtro de 3ª ordem.

As figuras (4.47) e (4.48) a seguir mostram, respectivamente, as formas de onda de tensão de fase e corrente de linha na saída do alimentador antes e após a conexão do filtro de 3ª ordem. É possível observar na figura (4.47) que praticamente não existe diferença entre as tensões na saída do alimentador antes e após o acoplamento do filtro. Contudo, o efeito do filtro se faz presente com maior ênfase sobre as correntes de linha, mostradas na figura (4.48) a seguir.

Nas figuras (4.49) e (4.50) a seguir, fica claro a atuação dos filtros de 3ª e 5ª ordens na saída do alimentador. Devido ao elevado nível de curto-circuito, as tensões não apresentaram distorções harmônicas significativas, que, antes do acoplamento dos filtros eram, nas fases A, B e C, respectivamente, de 2,57%, 2,56% e 2,54%. Com a atuação dos filtros, os referentes índices assumiram, para as fases A, B e C, os respectivos valores de 0,40%, 0,38% e 0,39%.

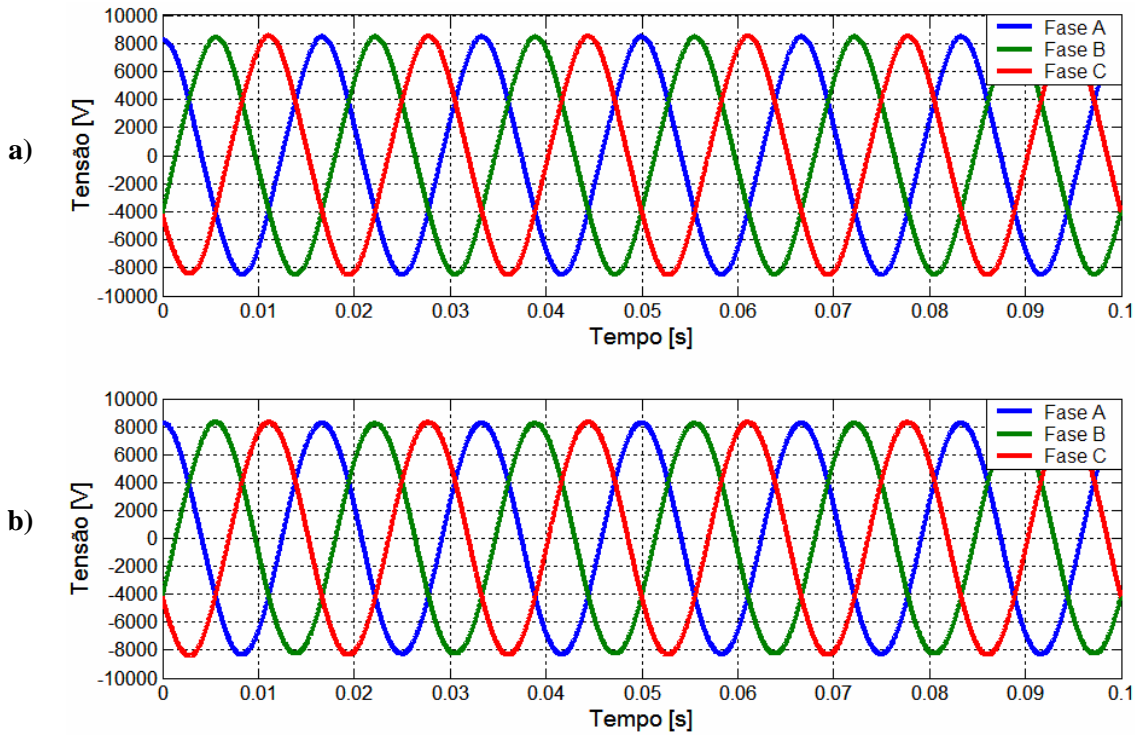


Figura 4.47 – a) Tensões de fase do sistema antes do acoplamento dos filtros de 3ª ordem. b) Tensões de fase após o acoplamento do filtro de 3ª ordem.

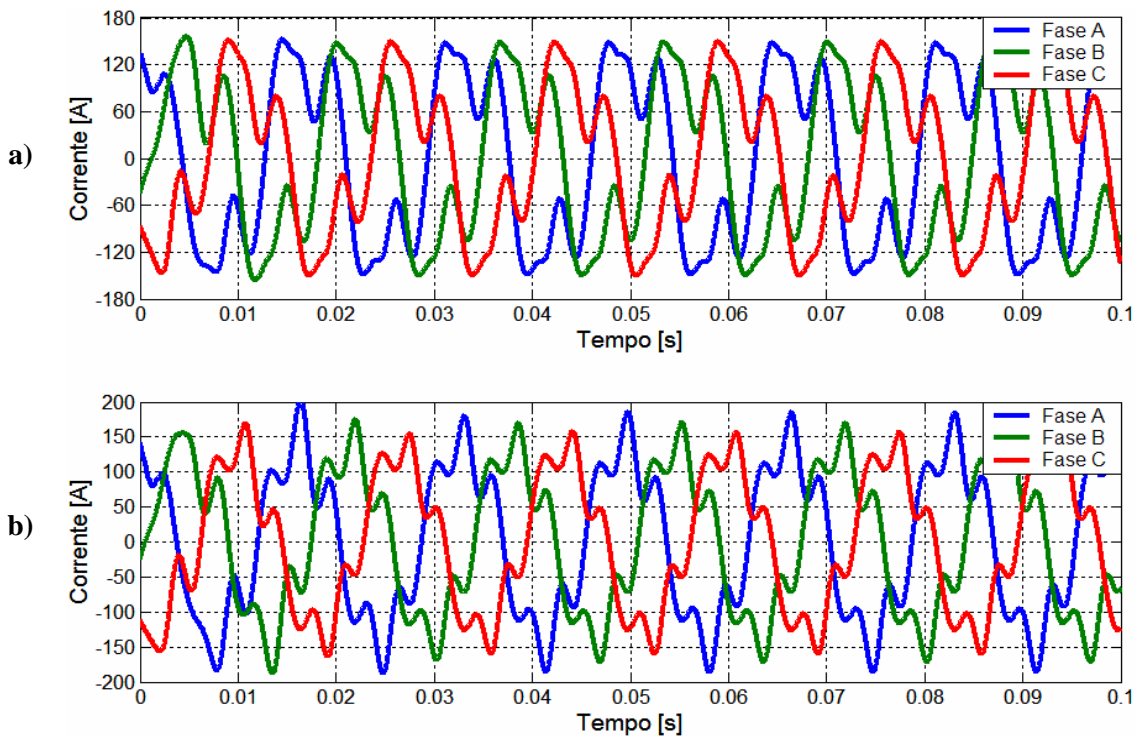


Figura 4.48 – a) Correntes de linha do sistema antes do acoplamento dos filtros de 3ª ordem. b) Correntes de linha após o acoplamento do filtro de 3ª ordem.

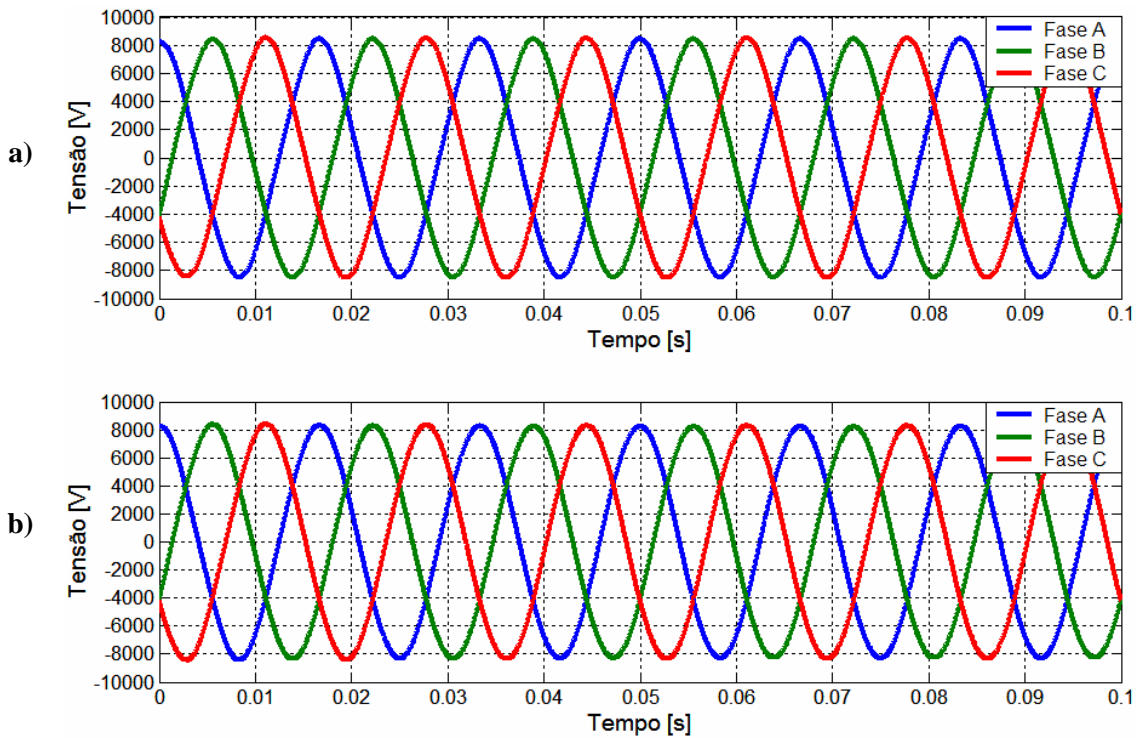


Figura 4.49 – a) Tensões de fase do sistema antes do acoplamento dos filtros de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordens. b) Tensões de fase após o acoplamento dos filtros de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordens.

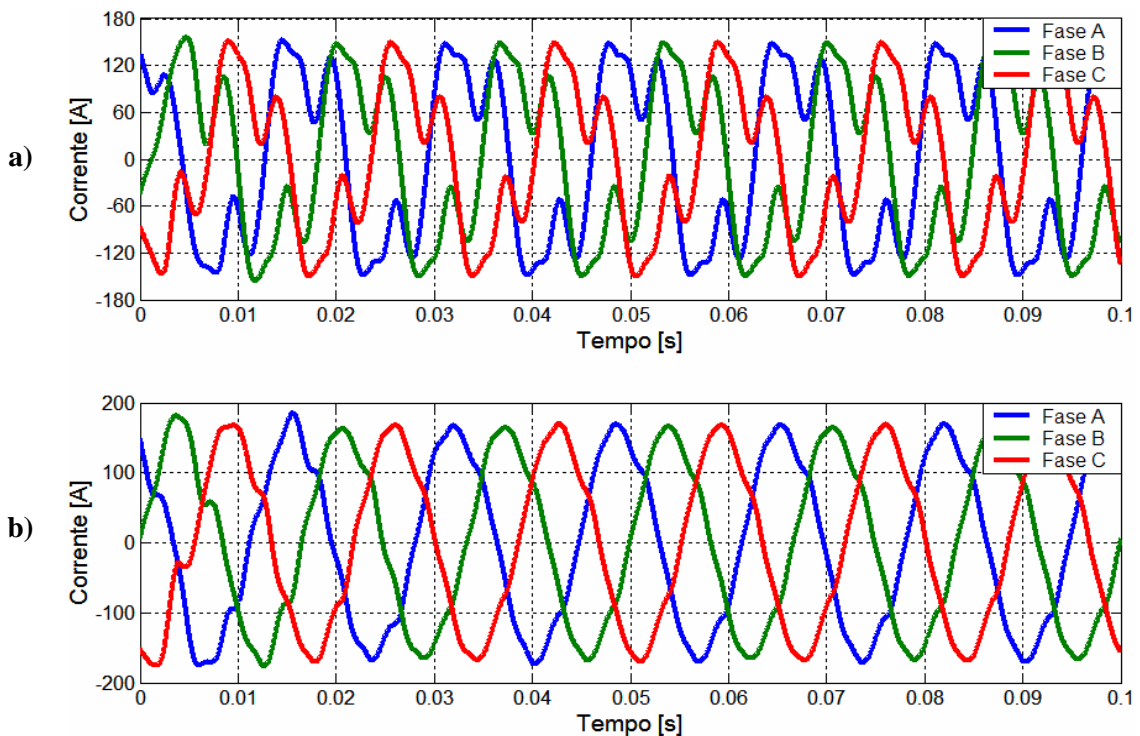


Figura 4.50 – a) Correntes de linha do sistema antes do acoplamento dos filtros de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordens. b) Correntes de linha após o acoplamento dos filtros de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordens.

Os espectros harmônicos das tensões de fase antes e após a conexão dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens são mostrados na figura (4.51) de forma a fornecer uma comparação entre eles.

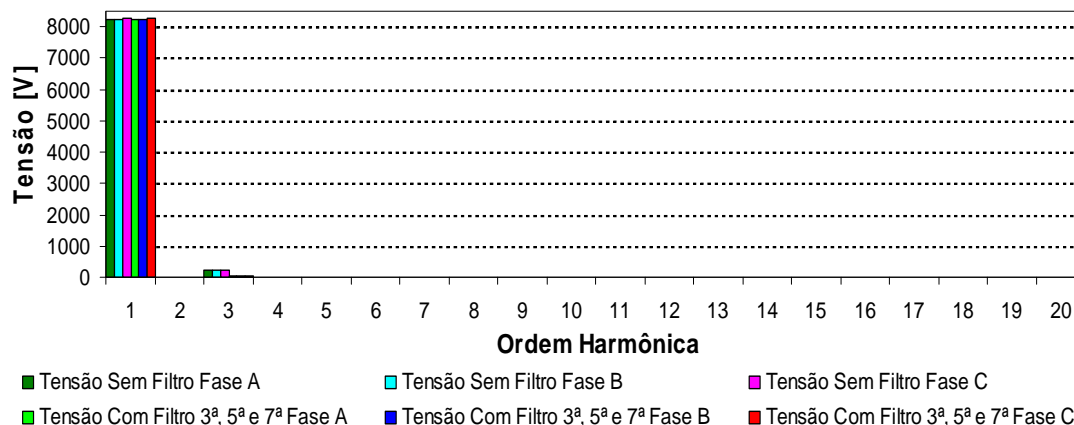


Figura 4.51 – Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de fase sem e com a presença dos filtros de 3ª e 5ª ordens, na saída do alimentador.

Já para as distorções harmônicas de corrente que, antes do acoplamento dos filtros eram de 44,61%, 47,44% e 47,09% nas fases A, B e C, respectivamente, tiveram, com a atuação dos filtros de 3ª ordem, seus valores reduzidos para 22,81%, 23,01% e 22,24%, nas fases A, B e C, respectivamente. A atuação conjunta dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens possibilitou a diminuição das distorções harmônicas de corrente, nas fases A, B e C, 6,21%, 5,83% e 5,57%, respectivamente. Estes resultados podem ser observados na figura (4.52).

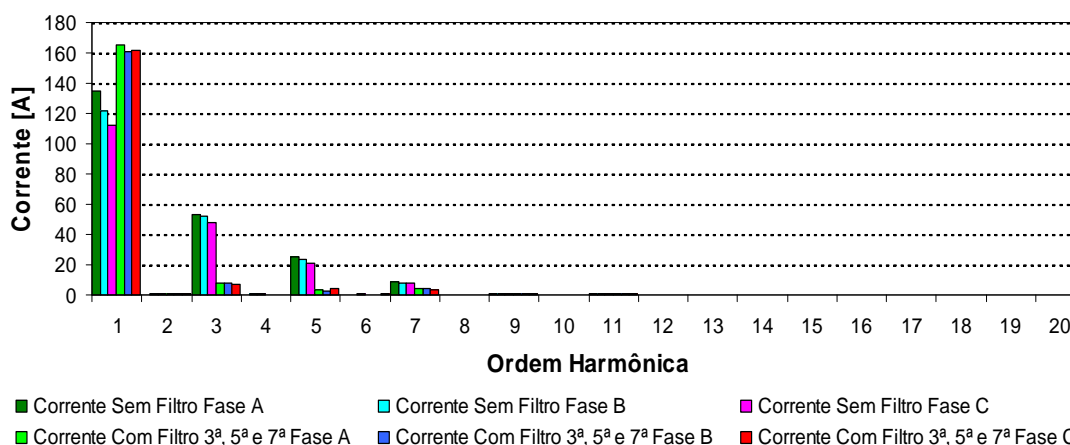


Figura 4.52 – Espectro harmônico das correntes de linha na saída do alimentador, antes e após a conexão dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordens.



Observa-se desta que, as correntes tiveram seu conteúdo harmônico fortemente reduzido, evidenciando a eficiência deste método na filtragem das correntes harmônicas.

Analogamente aos casos anteriores, a tabela (4.14) resume a variação do fator de potência no local de acoplamento dos filtros e na saída do alimentador antes e após a conexão dos filtros.

---

*Tabela 4.14 – Comportamento do fator de potência, por fase, no local de conexão do filtro e na saída do alimentador.*

---

	Ponto de Acoplamento dos Filtros				Saída do Alimentador			
	Sem Filtro		Com filtro		Sem filtro		Com filtro	
	$\text{Cos}(\phi_1)$	$\frac{\cos\phi}{\sqrt{1+DII^2}}$	$\text{Cos}(\phi_1)$	$\frac{\cos\phi}{\sqrt{1+DII^2}}$	$\text{Cos}(\phi_1)$	$\frac{\cos\phi}{\sqrt{1+DII^2}}$	$\text{Cos}(\phi_1)$	$\frac{\cos\phi}{\sqrt{1+DII^2}}$
Fase A	0,99267	0,8995	0,8564*	0,8547*	0,99934	0,9060	0,9069*	0,9051*
Fase B	0,97122	0,8709	0,7869*	0,7856*	0,98739	0,8859	0,8464*	0,8450*
Fase C	0,93264	0,8398	0,7125*	0,7114*	0,95802	0,8631	0,7792*	0,7780*

---

(\*) – Fator de potência capacitivo.

---

Considerando a variação do fator de potência mostrada na tabela (4.14) acima, é possível observar que o fator de potência pode ser utilizado como um indicador da qualidade da energia sob o ponto de vista de distorções harmônicas. Na sequência, a figura (4.53) abaixo mostra como se encontram as tensões e correntes do sistema após o acoplamento dos filtros.

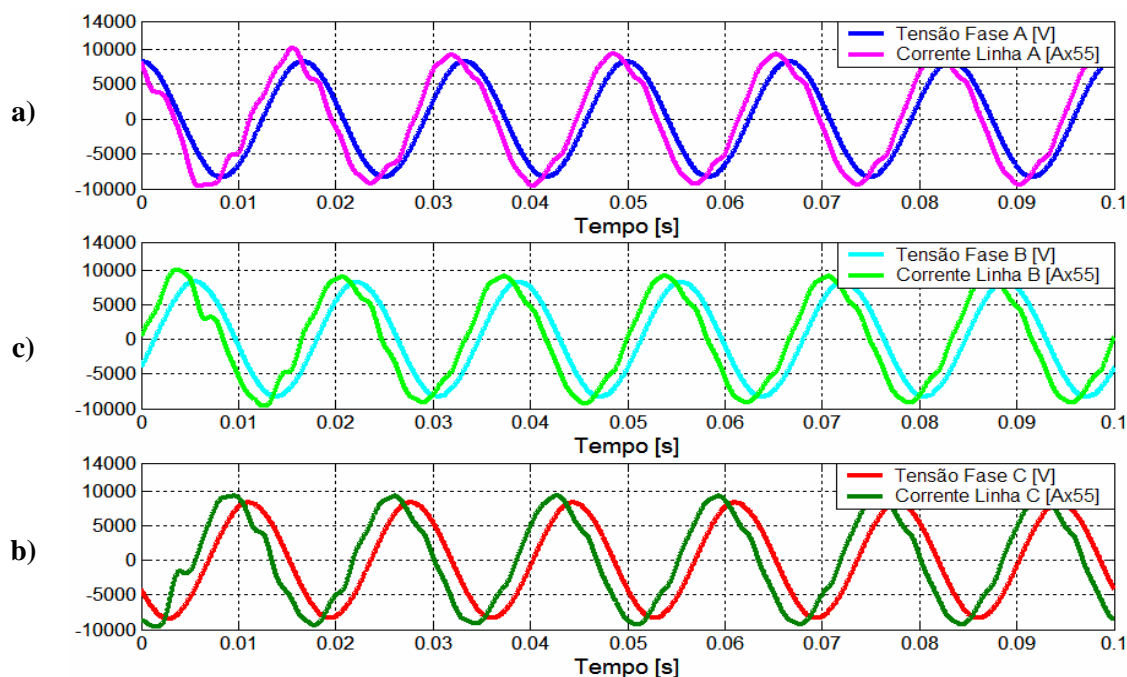


Figura 4.53 – a) Tensão da fase A e corrente da linha A; b) Tensão da fase B e corrente da linha B; c) Tensão da fase C e corrente da linha C.

Observa-se da figura (4.53) que a corrente de linha está adiantada da tensão de fase, indicando que o fator de potência encontra-se capacitivo, devido a presença dos bancos de capacitores dos filtros. Objetivando adequar as escalas entre a tensão e a corrente na figura para a comparação, a corrente de linha foi multiplicada por um fator 55.

Um outro indicador muito importante em se tratando de tensões e correntes harmônicas é a distorção harmônica total. Assim, a tabela (4.15) resume a variação de tais grandezas, tanto para as tensões de fase (*DTT*) quanto para as correntes de linha (*DTI*) do sistema antes e após a conexão dos filtros.

Tabela 4.15 – Variação da distorção harmônica total de tensão e corrente, por fase.

	Local de Acoplamento dos Filtros				Saída do Alimentador			
	Sem Filtro		Com filtro		Sem filtro		Com filtro	
	DTT%	DTI%	DTT%	DTI%	DTT%	DTI%	DTT%	DTI%
Fase A	14,421%	46,673%	2,83%	6,22%	2,9053%	46,536%	0,40%	6,21%
Fase B	13,897%	49,35%	2,68%	5,84%	2,9%	49,211%	0,38%	5,83%
Fase C	12,902%	48,283%	2,54%	5,57%	2,8675%	48,157%	0,39%	5,57%

Da tabela (4.15), observa-se de forma objetiva o desempenho dos filtros no sistema, onde a distorção harmônica de corrente foi reduzida, em média 38%, apresentando um desempenho satisfatório da topologia analisada.

#### **4.5.1 – COMENTÁRIOS GERAIS**

Devido à relativa simplicidade em sua modelagem e confiabilidade em seu funcionamento, os filtros sintonizados em derivação se tornam a solução mais utilizada em esquemas de mitigação ou minimização do fluxo de correntes harmônicas em sistemas industriais e comerciais. Neste sentido, os resultados das simulações mostraram que o método apresentou-se muito eficiente na filtragem harmônica, sendo possível observar que o sistema apresentou uma significativa melhora com o acoplamento dos filtros de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordens.

A aplicação dos filtros harmônicos sintonizados apresentou grandes benefícios no que tange à redução da distorção harmônica total de tensão e corrente, redução da distorção harmônica individual de tensão e corrente e aumento do fator de potência. Dar-se-á prosseguimento às análises dos demais filtros estudados.

Por outro lado, o uso de filtros harmônicos LC sintonizados em sistemas de distribuição deve ser criteriosamente analisado, devido ao problema da dessintonização, e da interação entre sua impedância e a impedância do sistema, provocando ressonância em outras frequências, que não as sintonizadas pelos filtros.

## 4.6 – AVALIAÇÃO DO FILTRO TIPO 4

A atuação de filtros sintonizados, centrados no princípio da ressonância paralela, foi realizada nesta seção. Assim, dois filtros paralelos, conectados em série foram modelados, para as frequências de 3ª e 9ª ordens.

Objetivando ainda minimizar a distorção harmônica de tensão devido à queda de tensão harmônica na impedância dos filtros, foram modelados dois outros filtros, em derivação, nas frequências de 3ª e 5ª ordens, mostrados na sequência.

A tabela (4.16) resume os parâmetros utilizados na modelagem dos filtros para a simulação deste caso.

---

*Tabela 4.16 – Resumo parâmetros dos filtros de 3ª, 9ª série modelados.*

---

	Série	
	3ª	9ª
Capacitor ( $\mu F$ )	260,12	56,73
Reator (mH)	3,108	1,765
Resistência ( $\Omega$ )	205,4	313,49
Frequência de sintonia (n)	2,9	8,85
Fator de Qualidade (Q)	60	60

---

As figuras a seguir mostram os resultados da simulação do filtro avaliado. As formas de onda das tensões de fase, no local de acoplamento dos filtros, antes e após a conexão dos filtros de 3ª 9ª ordens são mostradas na figura (4.54). Observa-se que houve uma discreta melhoria no nível de distorção harmônica de tensão, que antes do acoplamento dos filtros eram de 14,42%, 13,89% e 12,9% para as fases A, B e C, respectivamente e, após o acoplamento dos referidos filtros, no lado do sistema, os referidos níveis atingiram valores de 6,85%, 6,13% e 5,53% para as fases A, B e C, respectivamente. A obtenção destes valores se deve ao fato de o sistema apresentar a manutenção de alguns valores de tensões distorcidas

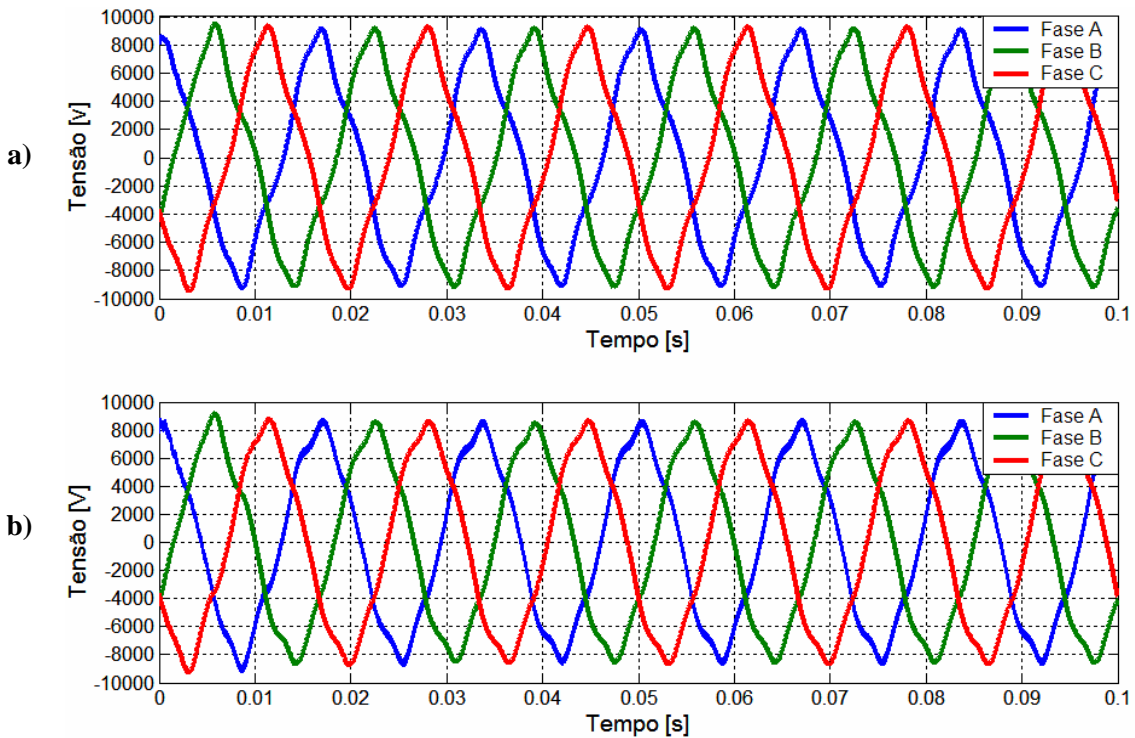


Figura 4.54 – a) Tensões de fase antes do acoplamento dos filtros de 3ª e 9ª ordens em série do lado do sistema. b) Tensões de fase após o acoplamento dos filtros de 3ª e 9ª ordens em série, do lado do sistema.

A tensão a que se refere a figura (4.54) foi obtida no local de acoplamento dos filtros, porém, no nó de conexão deste, de forma a verificar as tensões do lado do sistema.

A figura (4.55) mostra as tensões de fase, após a conexão dos filtros, no lado da carga, no local de acoplamento dos filtros, de forma a verificar o efeito da queda de tensão harmônica, provocada pela obstrução à passagem da corrente harmônica pela impedância dos filtros. Este efeito é, sem dúvida um dos inconvenientes da utilização de filtros harmônicos em série. A comparação entre a tensão no local de acoplamento dos filtros, antes e após a localização do filtro, ou seja, em dois locais adjacentes, porém distintos. Na referida figura, não é possível observar uma diferença significativa entre as duas tensões nas duas localidades. Contudo, tal diferença se faz presente na figura (5.56), onde uma comparação entre o espectro harmônico das tensões de fase nos locais em questão, ou seja, nos pontos antes do filtro (lado do sistema) e após (lado da carga).

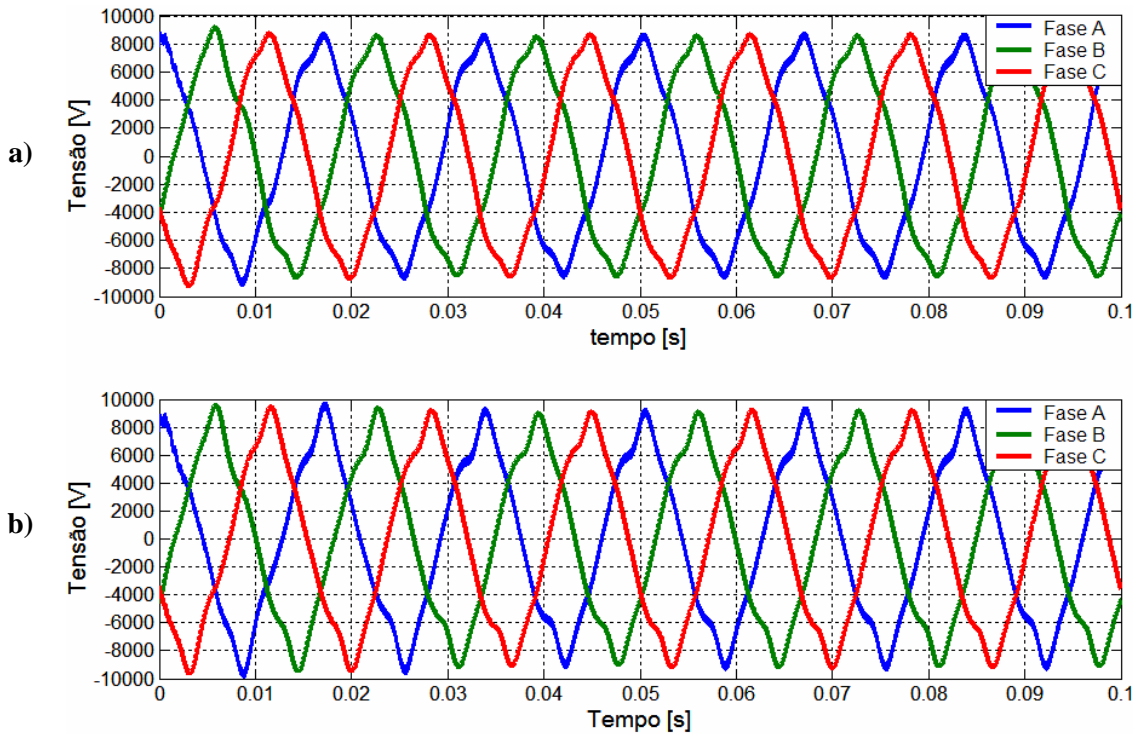


Figura 4.55 – a) Tensões de fase do lado do sistema com os filtros de 3ª e 9ª ordens. b) Tensões de fase do lado da carga com os filtros de 3ª e 9ª ordens, no ponto de acoplamento dos filtros.

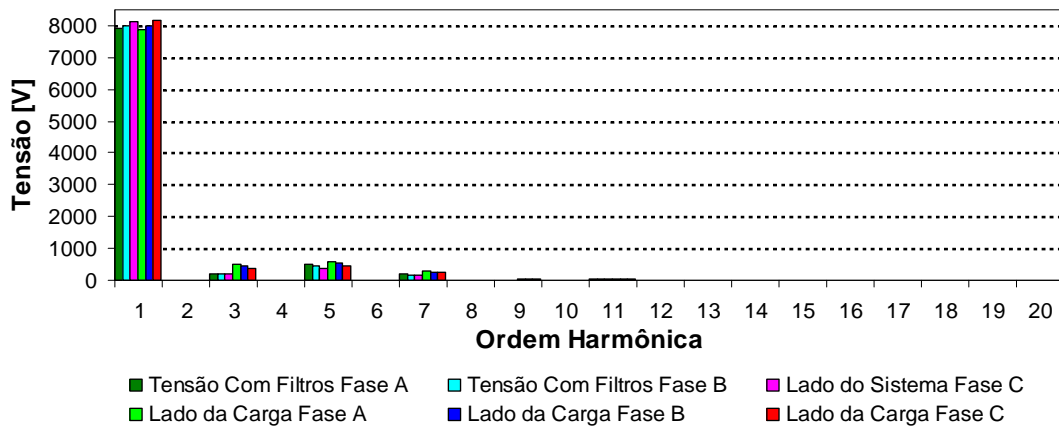


Figura 4.56 – Espectro harmônico da tensão de fase no ponto de acoplamento dos filtros, antes do filtro (lado do sistema) e após o filtro (lado da carga).

Considerando o lado da carga, as distorções harmônicas atingiram os níveis de 11,98%, 10,72% e 9,21%, nas fases A, B e C, respectivamente. Adicionalmente, a figura (4.57) mostra a interação dos filtros de 3ª e 9ª com o sistema, de acordo com a variação da impedância com a frequência. Observa-se desta que na fase A uma ressonância paralela na 11ª

harmônica. Observa-se também ressonâncias paralelas, nas quais os filtros foram sintonizados.

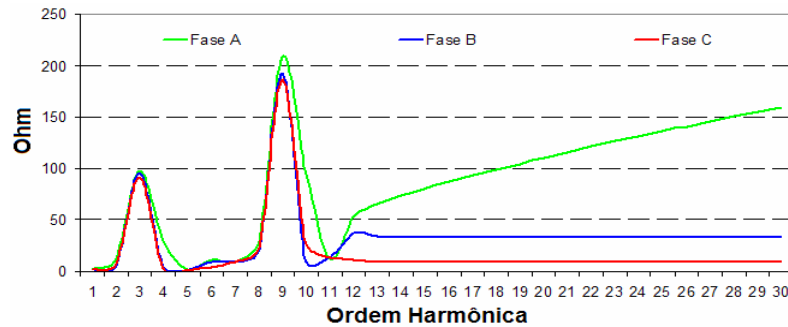


Figura 4.57 – Interação da impedância harmônica dos filtros de 3ª e 9ª com o sistema devido a variação da frequência.

Prosseguindo, a figura (4.58) mostra as correntes de linha antes e após o acoplamento dos filtros série de 3ª e 9ª ordens, no local de acoplamento dos filtros. A forma de onda mais aproximada de uma senóide, mostrada na figura (4.58b), em relação à figura (4.58a), é atribuída à atuação dos filtros sob avaliação.

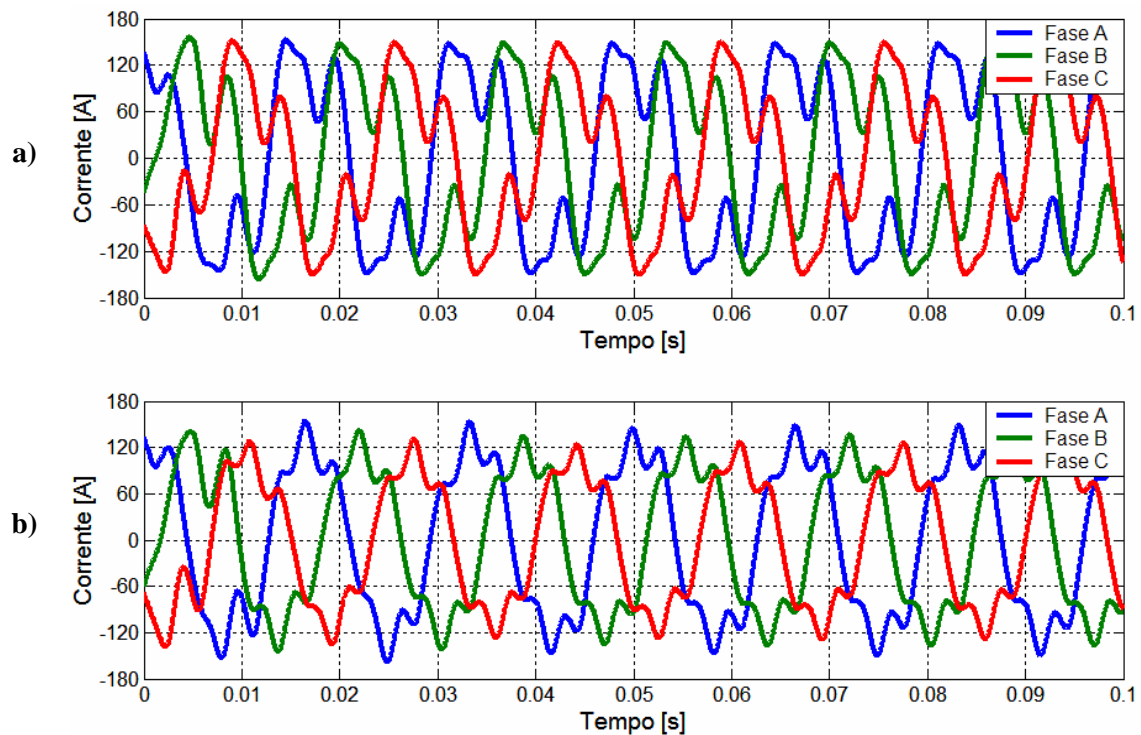
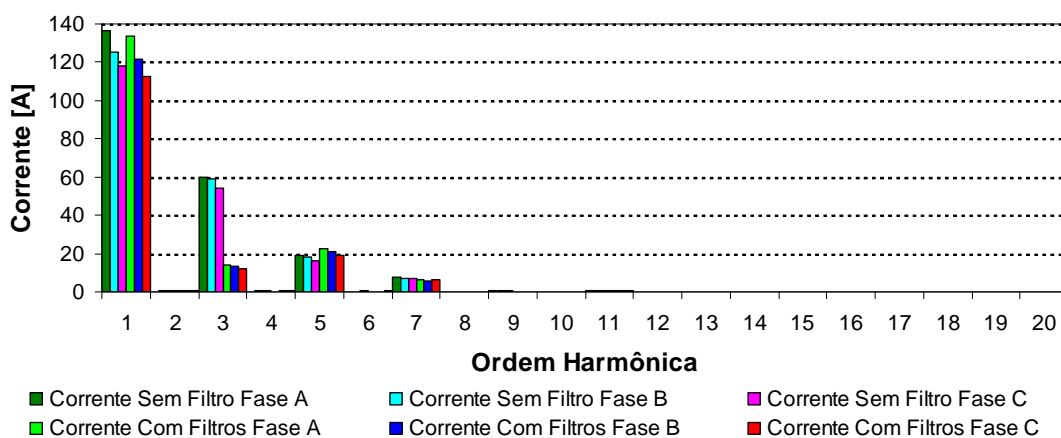


Figura 4.58 – a) Correntes de linha com os filtros de 3ª e 9ª ordens. b) Correntes de linha com os filtros de 3ª e 9ª ordens, no ponto de acoplamento dos filtros.

Com os filtros de 3ª e 9ª ordens em série, as distorções harmônicas de corrente que, no local de acoplamento dos filtros, antes do acoplamento destes, eram de 46,67%, 49,35% e 48,28% nas fases A, B e C, respectivamente, com a atuação dos filtros de 3ª e 9ª ordens, tais distorções reduziram para 18,96%, 19,19% e 18,68%, nas fases A, B e C, respectivamente.

Da figura (4.59) é possível avaliar a comparação entre o espectro harmônico das correntes de linha do sistema antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª e 9ª ordens no local de acoplamento dos filtros.



*Figura 4.59 – Espectro harmônico das correntes de linha antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 9ª ordens, em série.*

Ainda desta figura, observa-se a minimização das correntes de terceira e nona ordens, evidenciando a operação benéfica dos filtros no sistema.

A figura (4.60) abaixo, mostra que as correntes de 3ª e 9ª ordens, que circulavam no neutro, sofreram significativas reduções com o acoplamento dos filtros de mesmas ordens. Já a figura (4.61) apresenta o comportamento da corrente *RMS* no neutro do transformador do alimentador antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 9ª ordens.



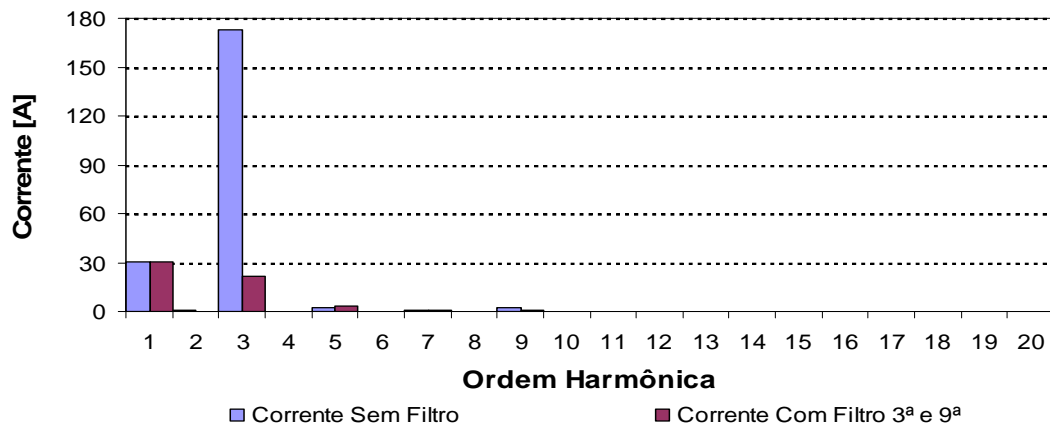


Figura 4.60 – Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após o acoplamento dos filtros de 3ª e 9ª ordens.

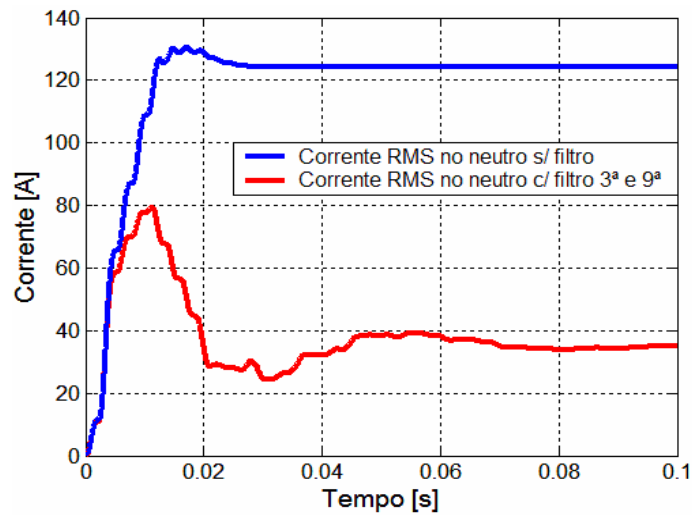


Figura 4.61 – Corrente RMS no neutro do transformador do alimentador sem e com os filtros de 3ª e 9ª ordens.

A tabela (4.17) mostra como o fator de potência no local da instalação foi alterado com o acoplamento dos filtros de 3ª e 9ª ordens.

Tabela 4.17 – Fator de potência, por fase, no local de acoplamento dos filtros após o acoplamento dos filtros de 3ª e 9ª ordens.

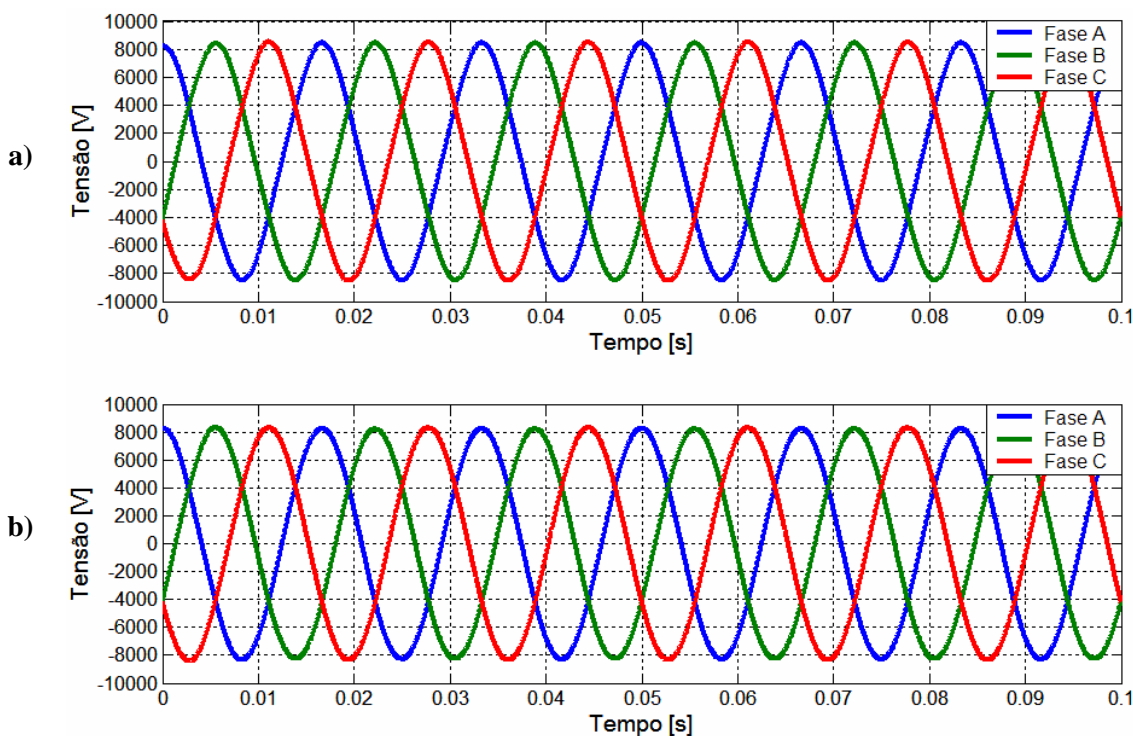
	Sem Filtro		Com Filtro	
	$\text{Cos}(\phi_1)$	$\frac{\cos \phi}{\sqrt{1 + DTI^2}}$	$\text{Cos}(\phi_1)$	$\frac{\cos \phi}{\sqrt{1 + DTI^2}}$
Fase A	0,99267	0,8995	0,9990	0,9785
Fase B	0,97122	0,8709	0,9977	0,9763
Fase C	0,93264	0,8398	0,9815	0,9618

A semelhança entre o fator de potência com e sem distorção harmônica, evidencia que os sinais de tensão e corrente estão com os seus respectivos conteúdos harmônicos minimizados, pela ação dos filtros de 3ª e 9ª ordens.

Assim, as figuras (4.62) e (4.63) a seguir mostram, respectivamente, as formas de onda das tensões de fase e correntes de linha, na saída do alimentador, antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 9ª ordens.

Observa-se que, na figura (4.62) que, praticamente não existe diferença entre as tensões na saída do alimentador antes e após o acoplamento dos filtros. Contudo, o efeito da atuação dos filtros se faz presente, com maior ênfase, sobre as correntes de linha, mostradas na figura (4.63) a seguir.

Devido ao elevado nível de curto-circuito como já mencionado anteriormente, as tensões não apresentaram distorções harmônicas significativas, que, antes do acoplamento dos filtros eram, nas fases A, B e C, respectivamente, de 2,57%, 2,56% e 2,54%. Com a atuação dos filtros, os referentes índices assumiram, para as fases A, B e C, os respectivos valores de 0,66%, 0,64% e 0,66%.



*Figura 4.62 – a) Tensões de fase antes do acoplamento dos filtros de 3ª e 9ª ordens. b) Tensões de fase após o acoplamento dos filtros de 3ª e 9ª ordens, na saída do alimentador.*

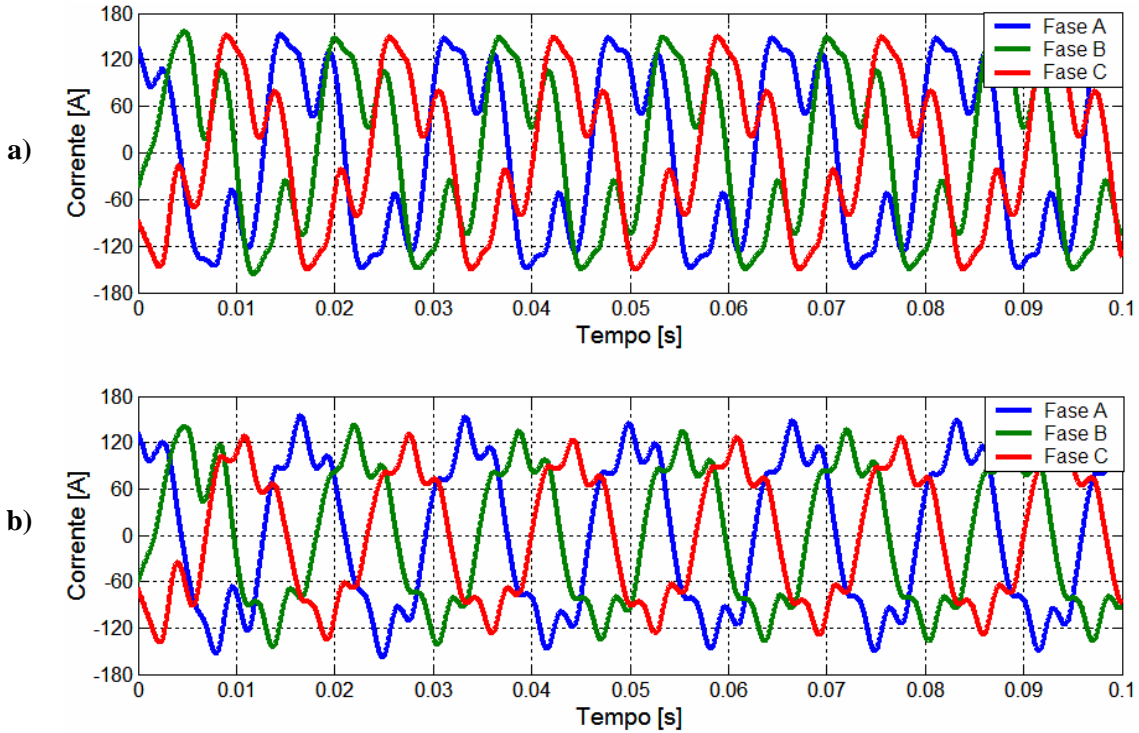


Figura 4.63 – a) Correntes de linha antes do acoplamento dos filtros de 3ª e 9ª ordens. b) Correntes de linha após o acoplamento dos filtros de 3ª e 9ª ordens, na saída do alimentador.

Os espectros harmônicos das tensões de fase correspondentes ao da figura (4.62), na saída do alimentador, antes e após a conexão dos filtros de 3ª e 9ª ordens são mostrados na figura (4.64) de forma a fornecer uma comparação entre eles.

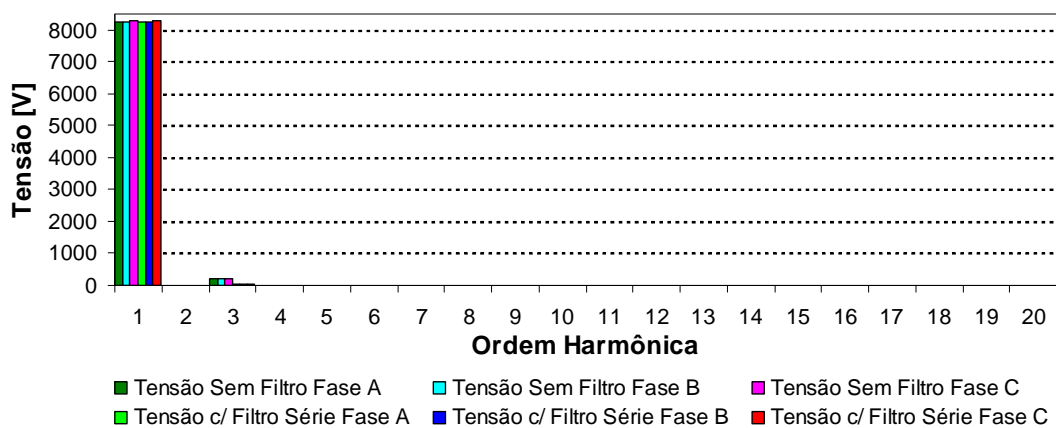


Figura 4.64 – Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de fase sem e com a presença dos filtros de 3ª e 9ª ordens, na saída do alimentador.

As distorções harmônicas de corrente correspondentes à da figura (4.62), na saída do alimentador que, antes do acoplamento dos filtros eram de 44,61%, 47,44% e 47,09% nas fases A, B e C, respectivamente, tiveram, com a atuação dos filtros de 3ª e 9ª ordens, seus valores reduzidos para 18,90%, 19,13% e 18,62%, nas fases A, B e C, respectivamente.

Objetivando minimizar a queda de tensão harmônica gerada pela queda de tensão na impedância dos filtros, foram modelados dois outros filtros, em derivação, um sintonizado em 171 Hz ( $n=2,85$ ) e 291 Hz ( $n=4,85$ ). A tabela (4.18) mostra os valores dos parâmetros utilizados na modelagem dos filtros de 3ª e 5ª ordens.

---

*Tabela 4.18 – Resumo dos parâmetros dos filtros de 3ª, 9ª série e 3ª e 5ª ordens derivação modelados.*

---

	Derivação	
	3ª	5ª
Capacitor ( $\mu F$ )	16,71	2,08 (em Delta)
Reator (mH)	50,06	46,75
Resistência ( $\Omega$ )	0,92	1,44
Frequência de sintonia (n)	2,85	4,85
Fator de Qualidade (Q)	60	40

As figuras (4.65) e (4.66) mostram, respectivamente, as tensões de fase e correntes de linha, no local de acoplamento dos filtros, no lado do sistema, com a ação conjunta dos filtros série e em derivação.

A atuação conjunta dos filtros de 3ª, 9ª em série, e 3ª e 5ª em derivação possibilitou a redução das distorções harmônicas de corrente, nas fases A, B e C, para 4,92%, 4,23% e 4,37%, respectivamente, no ponto de acoplamento dos filtros.

Na figura (4.67) é possível verificar a comparação entre o espectro harmônico das tensões de fase do sistema, com somente os filtros de 3ª e 9ª em série, e com os filtros em série e os filtros de 3ª e 5ª ordens, em derivação, no local de acoplamento dos filtros, no lado do sistema, e a figura (4.66) mostra uma comparação análoga no lado da carga.

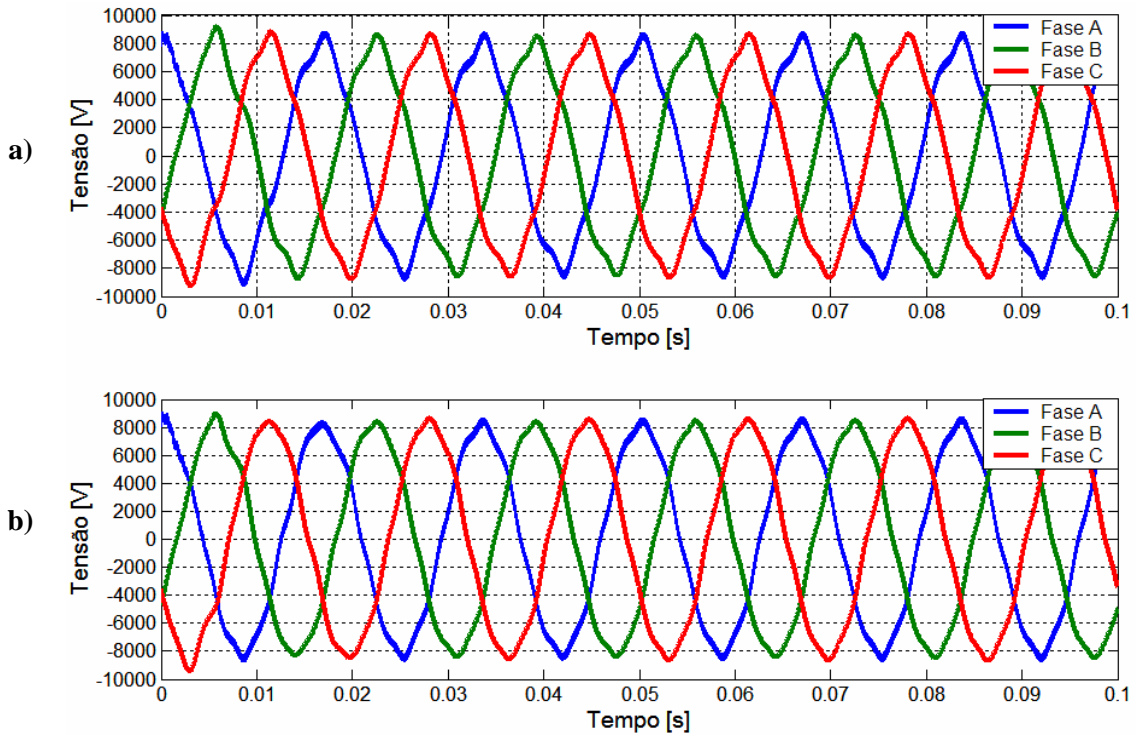


Figura 4.65 – a) Tensões de fase no local de acoplamento dos filtros, no lado do sistema, com os filtros série e antes do acoplamento dos filtros em derivação. b) Tensões de fase no local de acoplamento dos filtros, no lado do sistema, com os filtros série e os filtros em derivação.

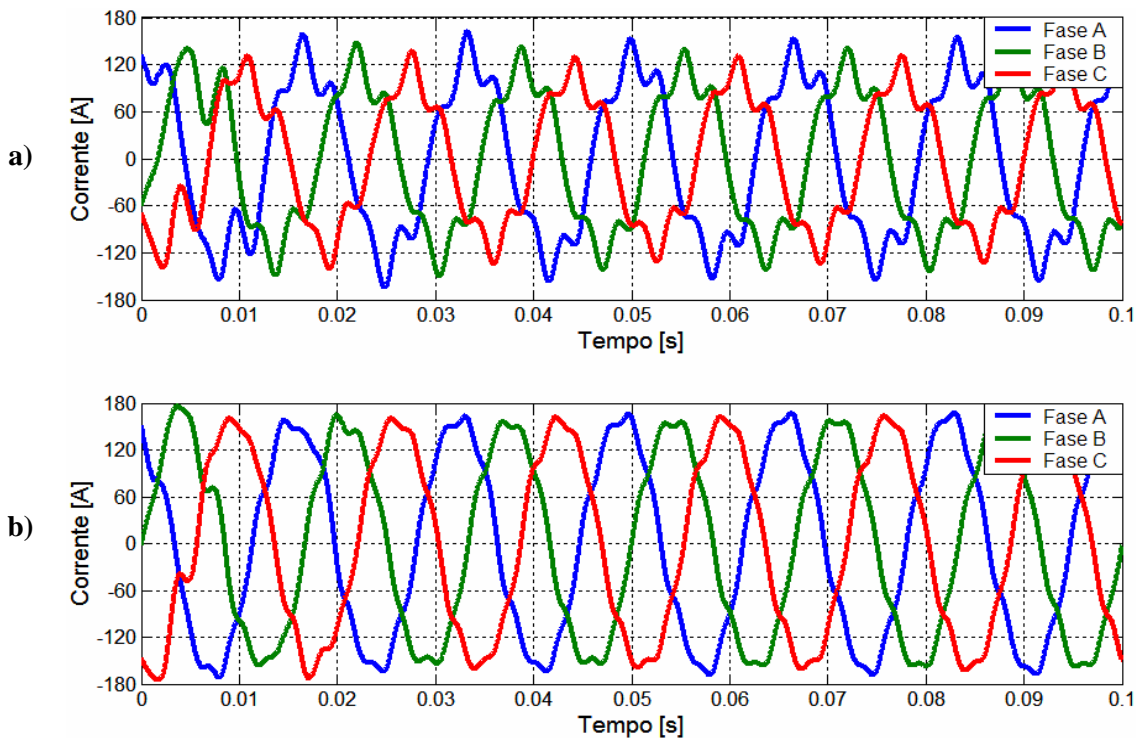


Figura 4.66 – a) Correntes de linha no local de acoplamento dos filtros, no lado do sistema, com os filtros série e antes do acoplamento dos filtros em derivação. b) Correntes de linha no local de acoplamento dos filtros, no lado do sistema, com os filtros série e os filtros em derivação.

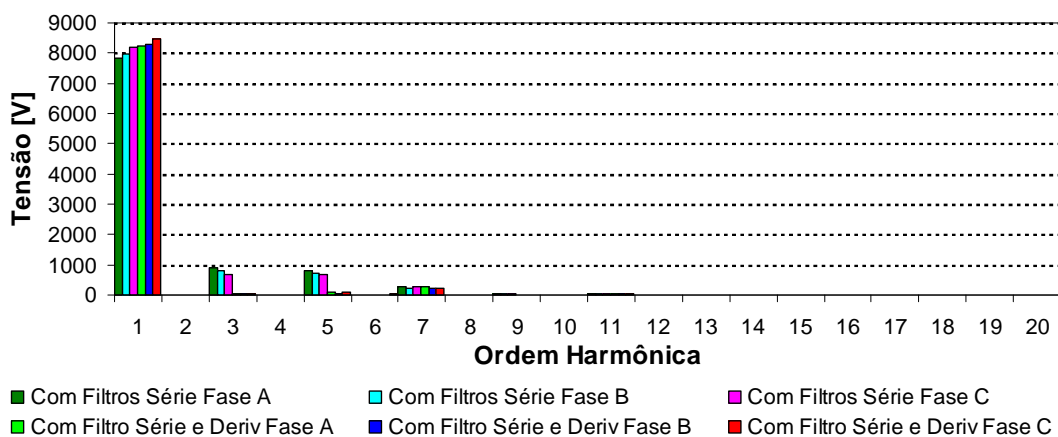


Figura 4.67 – Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de fase com somente os filtros série e com a presença dos filtros série e derivação, no local de acoplamento dos filtros, no lado do sistema.

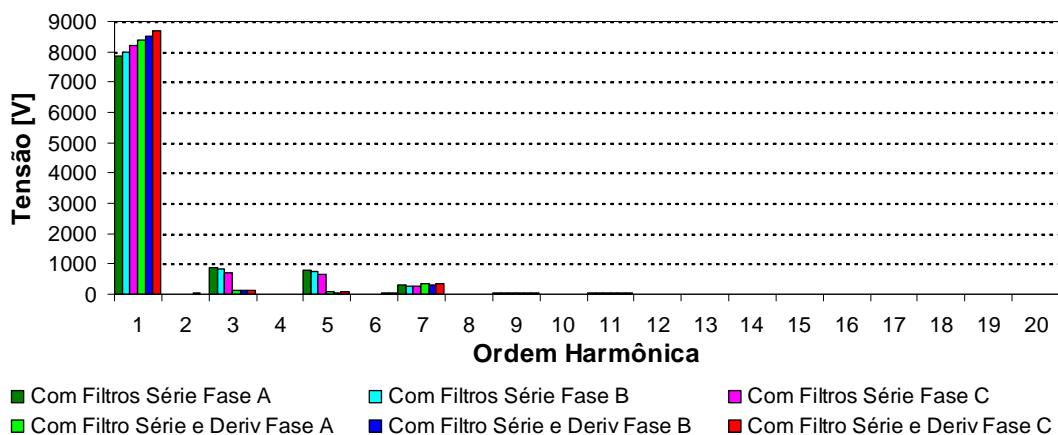
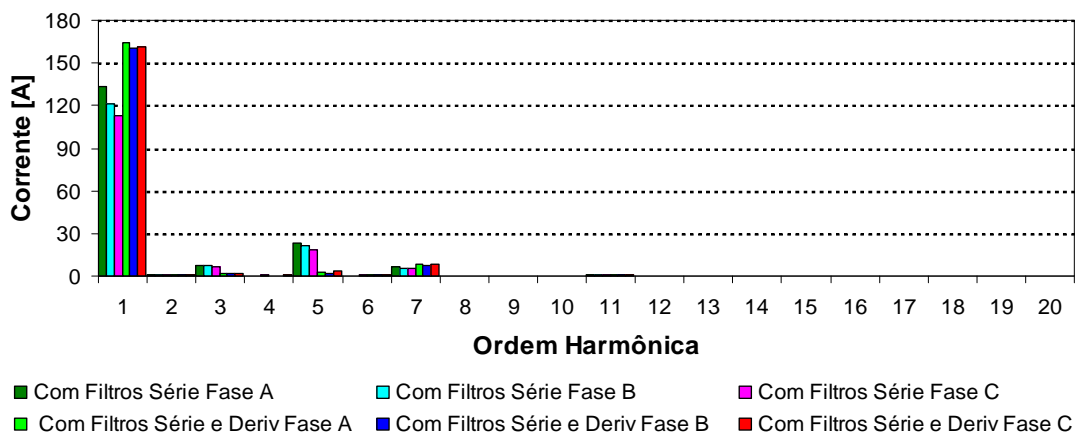


Figura 4.68 – Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de fase com somente os filtros série e com a presença dos filtros série e derivação, no ponto de acoplamento dos filtros, no lado da carga.

Observa-se na figura (4.68) que a tensão fundamental no lado da carga sofreu um aumento significativo em seu módulo, evidenciando um elevado fator de potência no referido local. A minimização da distorção harmônica de tensão no lado da carga sugere que a atuação dos filtros em derivação foi satisfatória, demonstrando, mais uma vez, a eficiência deste tipo de estrutura para filtragem harmônica. A figura (4.69) mostra o espectro harmônico das correntes de linha, no **local** de acoplamento dos filtros, no lado do sistema, com a presença dos filtros em série e os em derivação.



*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 local de acoplamento dos filtros, no lado do sistema.*

A operação conjunta dos filtros série e derivação possibilitou que as correntes atingissem um patamar aceitável, no que tange à circulação de correntes harmônicas em sistemas de distribuição, conforme sugere a referência [1]. Neste sentido, a figura (4.70) mostra o espectro harmônico das correntes de linha, no local de acoplamento, no lado da carga, com a presença dos filtros em série e em derivação. Como se observa na referida figura, a atuação conjunta dos filtros série e derivação, no local de acoplamento dos filtros possibilitou uma significativa minimização do conteúdo harmônico nas correntes de linha do sistema, no local em questão. Observa-se também que praticamente não existe diferença entre as correntes de linha no lado da carga e no lado do sistema, tanto para as tensões de fase (figuras (4.67) e (4.68)), como também para as correntes de linha (figuras (4.69) e (4.70)).

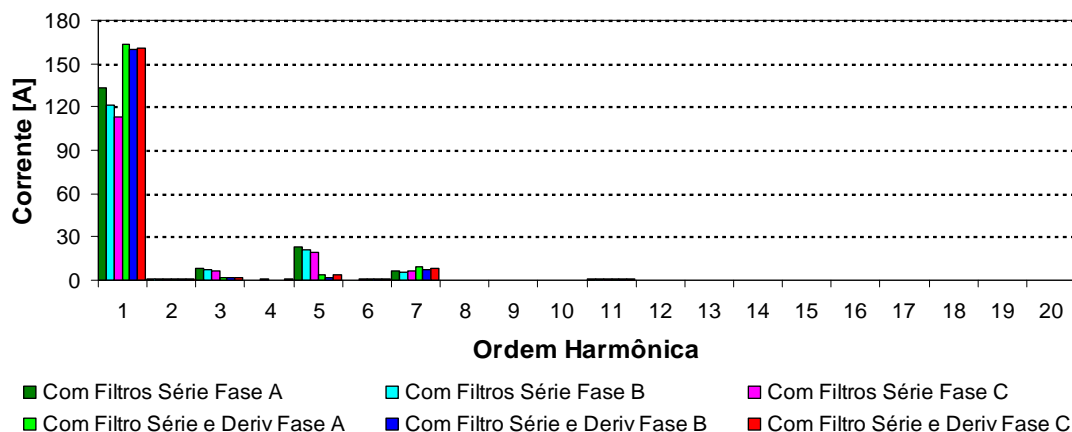


Figura 4.70 – Comparação entre os espectros harmônicos das correntes de linha com somente os filtros série e com a presença dos filtros série e derivação, no local de acoplamento dos filtros, no lado da carga.

Adicionalmente, as figuras (4.71) e (4.72) mostram, respectivamente, as tensões de fase e correntes de linha, na saída do alimentador, com os filtros em série e em derivação conectados ao sistema.

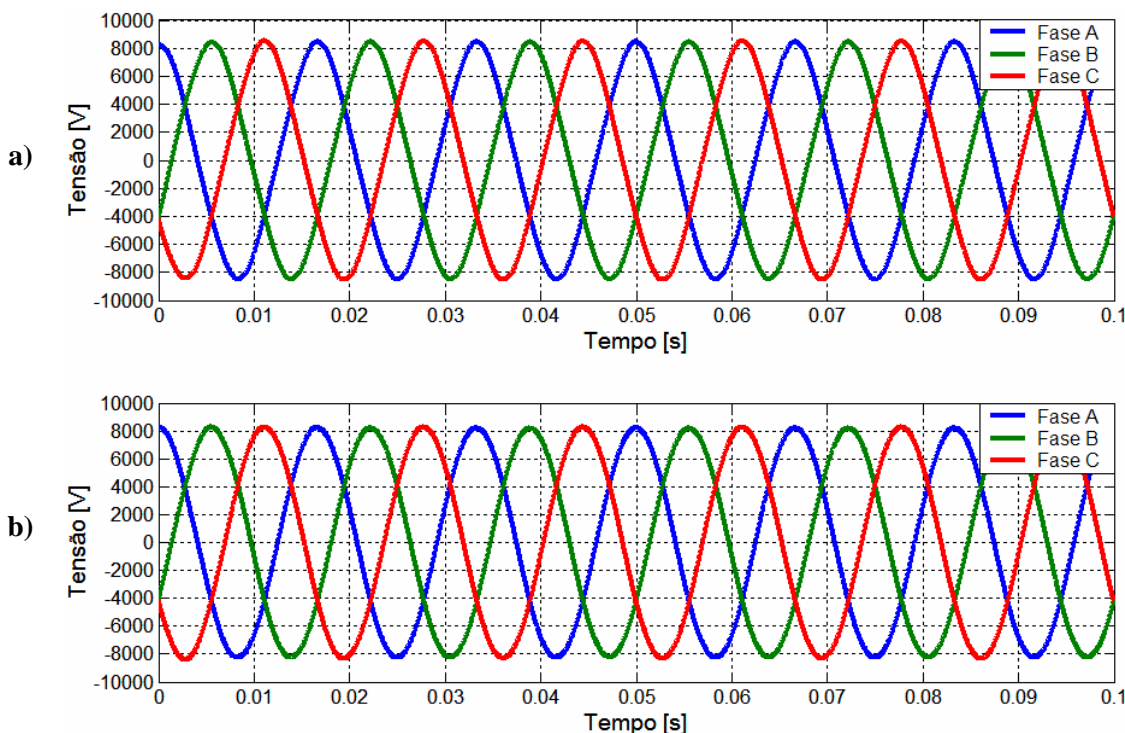


Figura 4.71 – a) Tensões de fase na saída do alimentador com os filtros série e antes do acoplamento dos filtros em derivação. b) Tensões de fase na saída do alimentador, com os filtros série e os filtros em derivação.



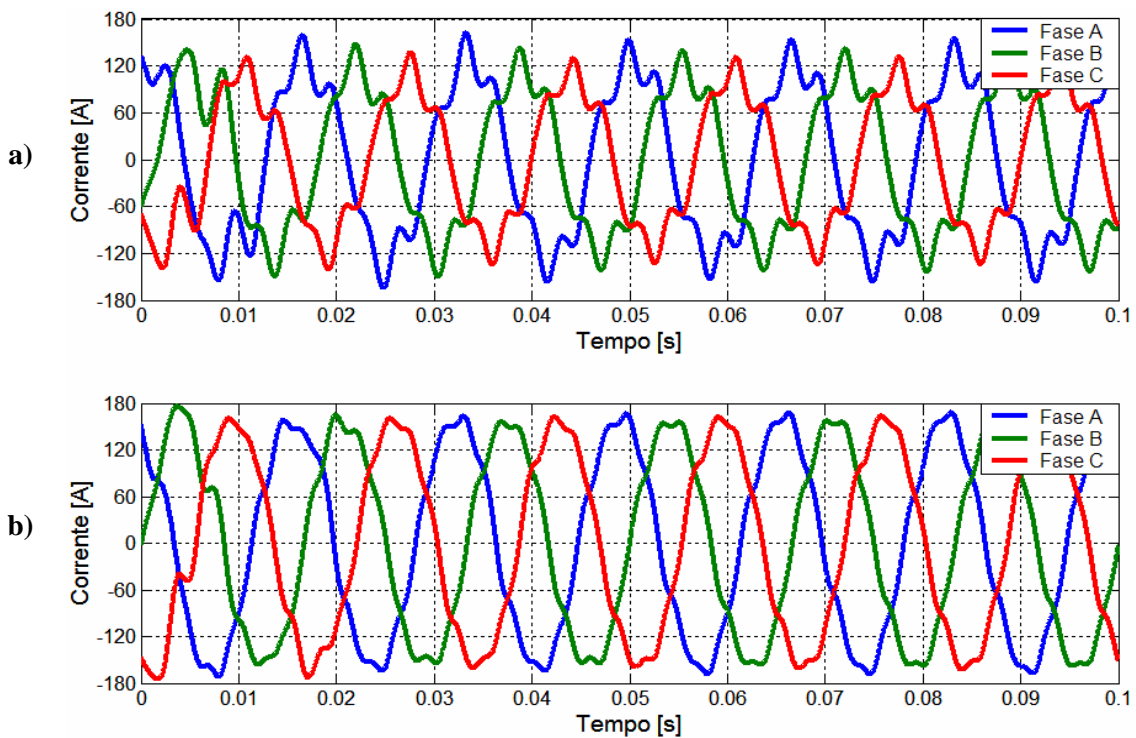


Figura 4.72 – a) Correntes de linha na saída do alimentador, com os filtros série e antes do acoplamento dos filtros em derivação. b) Correntes de linha na saída do alimentador, com os filtros série e os filtros em derivação.

Observa-se da figura (4.71) que, a distorção de tensão na saída do alimentador não se faz presente visivelmente, através da observação de sua forma de onda, devido ao elevado nível de curto circuito. Por outro lado, a distorção harmônica de corrente sofreu uma redução significativa, reduzindo-se para 5,89%, 5,29% e 5,77%, nas fases A, B e C, respectivamente. A figura (4.73) mostra a comparação entre o espectro harmônico da tensão de fase na saída do alimentador com somente os filtros em série e com os filtros em série e derivação, e a figura (4.74) mostra a mesma comparação, porém com o espectro harmônico da corrente de linha. A sensível melhora evidenciada pelas figuras (4.73) e (4.74) acima, sugerem que o método é eficiente, no que tange à filtragem harmônica.

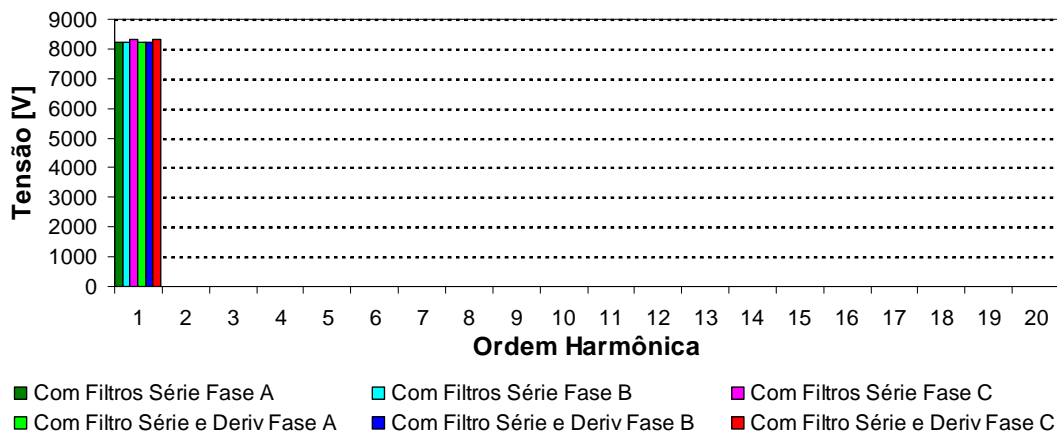


Figura 4.73 – Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de fase com somente os filtros série e com a presença dos filtros série e derivação, na saída do alimentador.

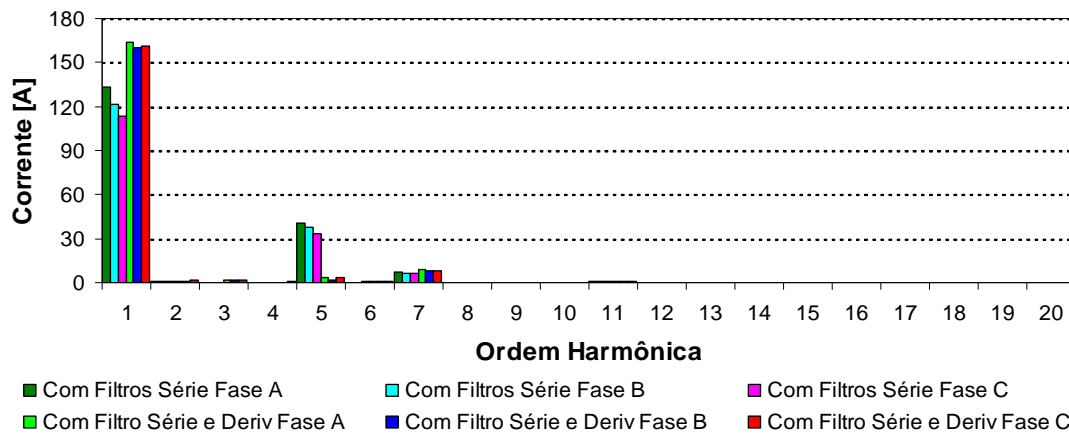


Figura 4.74 – Comparação entre os espectros harmônicos das correntes de linha com somente os filtros série e com a presença dos filtros série e derivação, na saída do alimentador.

As figuras (4.75) e (4.76) mostram, respectivamente o espectro da corrente no neutro e o comportamento do valor *RMS* da mesma, com somente os filtros em série e com os filtros em série e derivação.

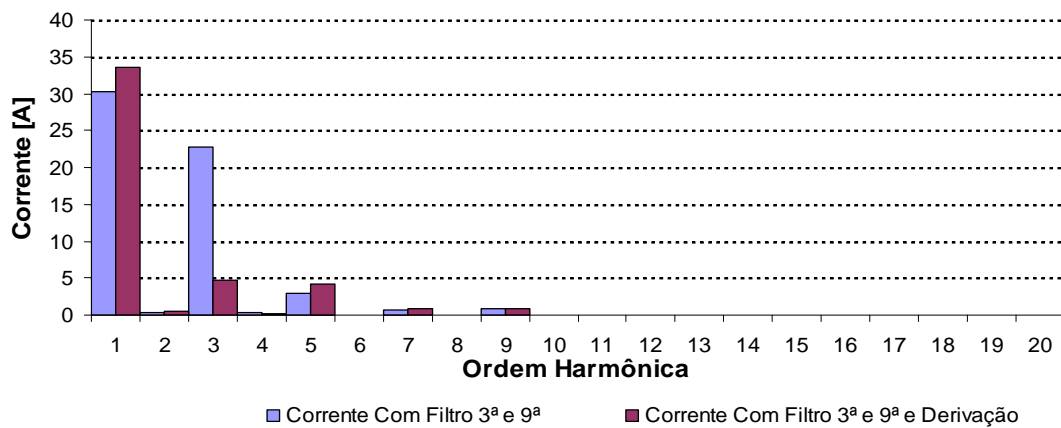


Figura 4.75 – Comparação entre os espectros harmônicos das correntes no neutro com somente os filtros série e com a presença dos filtros série e derivação.

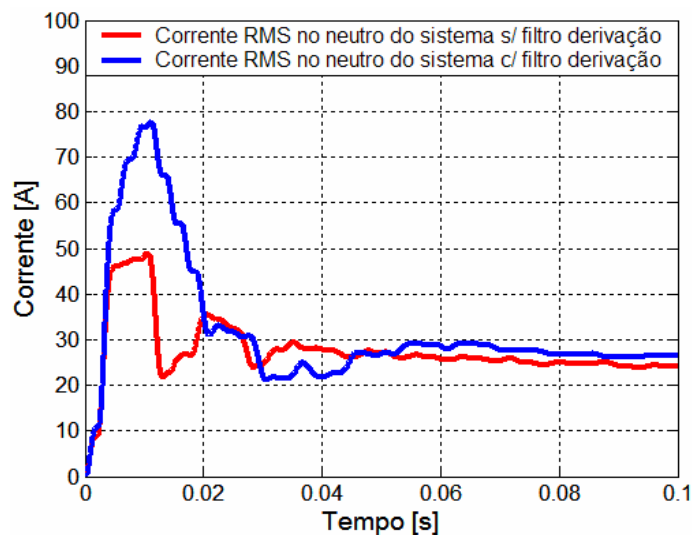


Figura 4.76 – Corrente RMS no neutro do transformador do alimentador, com somente os filtros em série e com os filtros em série e derivação.

Por fim, a tabela (4.18) resume a variação do fator de potência sobre o ponto de acoplamento dos filtros e na saída do alimentador antes e após o acoplamento dos filtros. Como anteriormente, através da variação do fator de potência mostrada na tabela em questão, é possível a sua utilização como um indicador da qualidade da energia.

*Tabela 4.19 – Comportamento do fator de potência, por fase.*

	Local de Acoplamento dos Filtros				Saída do Alimentador			
	Sem Filtro		Com filtro		Sem filtro		Com filtro	
	$\text{Cos}(\phi_1)$	$\frac{\cos\phi}{\sqrt{1+DII^2}}$	$\text{Cos}(\phi_1)$	$\frac{\cos\phi}{\sqrt{1+DII^2}}$	$\text{Cos}(\phi_1)$	$\frac{\cos\phi}{\sqrt{1+DII^2}}$	$\text{Cos}(\phi_1)$	$\frac{\cos\phi}{\sqrt{1+DII^2}}$
Fase A	0,99267	0,8995	0,8705*	0,8689*	0,99934	0,9060	0,9330*	0,9292*
Fase B	0,97122	0,8709	0,8032*	0,8020*	0,98739	0,8859	0,8756*	0,8744*
Fase C	0,93264	0,8398	0,7289*	0,7277*	0,95802	0,8631	0,8104*	0,8091*

(\*) – Fator de potência capacitivo.

Outro indicador quantitativo da qualidade da energia importante é o nível de distorção harmônica de tensão e/ou corrente. Neste sentido, a tabela (4.19) resume a variação das referidas grandezas, tanto para as tensões de fase (*DTT*) e correntes de linha (*DTI*) do sistema antes e após o acoplamento dos filtros.

*Tabela 4.20 – Variação da distorção harmônica total de tensão e corrente, por fase.*

	Local de Acoplamento				Saída do Alimentador			
	Sem Filtro		Com filtro		Sem filtro		Com filtro	
	DTT%	DTI%	DTT%	DTI%	DTT%	DTI%	DTT%	DTI%
Fase A	14,421%	46,673%	4,92%	5,91%	2,9053%	46,536%	0,12%	5,89%
Fase B	13,897%	49,35%	4,23%	5,30%	2,9%	49,211%	0,16%	5,29%
Fase C	12,902%	48,283%	4,37%	5,78%	2,8675%	48,157%	0,13%	5,77%

A tabela (4.19) mostra, de forma objetiva o desempenho dos filtros no sistema, podendo-se verificar que a distorção harmônica de corrente foi reduzida, em média 40%, e que a topologia analisada apresentou um desempenho satisfatório.

### **4.6.1 – COMENTÁRIOS GERAIS**

Os resultados das simulações mostraram que o método apresentou-se muito eficiente na filtragem harmônica pretendida. Foi possível observar que o sistema apresentou uma significativa melhoria com a conexão dos filtros em série e derivação. Assim, pelos resultados das simulações, verifica-se que a maioria das correntes harmônicas presentes tiveram os seus valores reduzidos.

A aplicação dos filtros harmônicos sintonizados apresentou-se benéfica, no que tange à redução da distorção harmônica total de tensão e corrente, redução da distorção harmônica individual de tensão e corrente e aumento do fator de potência. O fluxo de correntes harmônicas no neutro do alimentador foi fortemente reduzido. A conexão dos filtros ao sistema resultou em um equilíbrio no sistema, atuando de forma a compensar as correntes nas fases do sistema. A maior desvantagem dos filtros em estudo se faz presente na quantidade de filtros utilizados, onerando a aplicação destes filtros em sistemas reais de distribuição.

## **4.7 – AVALIAÇÃO DO FILTRO TIPO 5**

Os filtros estudados nesta etapa do trabalho, assim como os filtros série do item anterior, são centrados no princípio da ressonância paralela, e tiveram metodologia de cálculo similar, tornando-se dispensável a consideração de aspectos mais detalhados.

A atuação de filtros sintonizados, centrados no princípio da ressonância paralela, foi realizada também nesta seção. Devido à localização do referido filtro nesta etapa, apenas um filtro foi modelado. O filtro em questão é um filtro paralelo, conectado em série com o neutro e sintonizado na frequência de 174 Hz ( $n=2,9$ ).

As análises desenvolvidas aqui seguem os mesmos procedimentos utilizados para os tipos de filtros anteriores. Os locais analisados em questão são: a saída do alimentador, e o local de acoplamento dos filtros anteriormente considerados..

A tabela (4.20) resume então os valores dos parâmetros utilizados na simulação dos filtros para este caso.

---

*Tabela 4.21 – Resumo dos filtros de 3ª ordem em série harmônica modelados.*

---

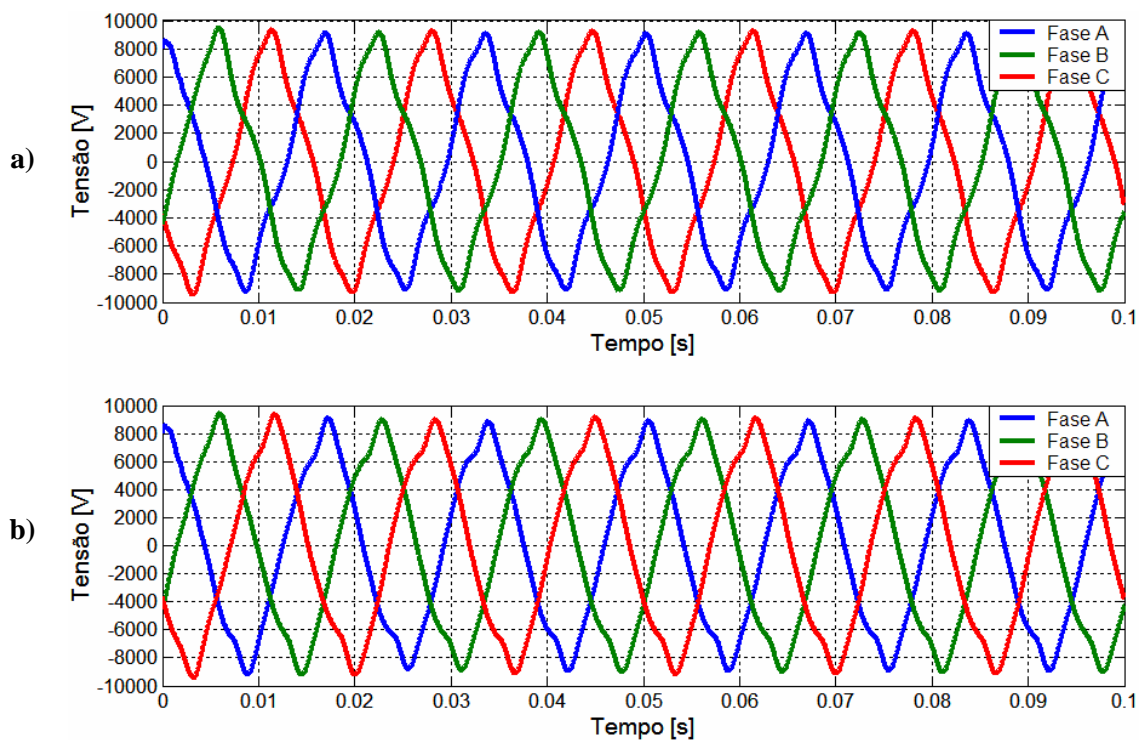
	3ª
Capacitor ( $\mu F$ )	490,54
Reator (mH)	1,705
Resistência ( $\Omega$ )	111,8
Frequência de sintonia (n)	2,9
Fator de Qualidade (Q)	60

---

As figuras a seguir mostram os resultados da simulação do filtro aqui avaliado. As formas de onda das tensões de fase, no local de acoplamento dos filtros, antes e após o acoplamento do filtro de 3ª ordem são mostradas na figura (4.77). Observa-se que houve uma discreta melhoria no nível de distorção harmônica de tensão, que antes do acoplamento dos filtros eram de 14,42%, 13,89% e 12,9% para as fases A, B e C, respectivamente e, após o acoplamento dos referidos filtros, tais níveis assumiram os valores de 8,55%, 8,55% e 9,01% para as fases A, B e C, respectivamente. A obtenção destes valores se deve ao fato de o sistema apresentar a manutenção de alguns valores de tensões distorcidas, provenientes da queda de tensão harmônica ocorrida no filtro.

A figura (4.78) mostra as tensões de fase, após a conexão dos filtros, no lado da carga, no local de acoplamento dos filtros, de forma a verificar o efeito da queda de tensão harmônica, provocada pela passagem da corrente harmônica pela impedância dos filtros. Este efeito é portanto, a maior desvantagem da utilização de filtros harmônicos em série. A

comparação é feita entre a tensão no local de acoplamento dos filtros, antes e após a conexão do filtro. Na referida figura, não é possível observar uma diferença significativa entre as duas tensões. Tal diferença se faz presente na figura (5.79), onde é feita uma comparação entre o espectro harmônico das tensões de fase nos pontos em questão, ou seja, nos pontos antes do filtro (lado do sistema) e após (lado da carga).



*Figura 4.77 – a) Tensões de fase antes do acoplamento do filtro de 3ª ordem em série. b) Tensões de fase após o acoplamento do filtro de 3ª ordem em série, no ponto de acoplamento dos filtros*

Como é possível observar na figura (4.77), o efeito de queda de tensão harmônica se fez presente na forma de onda das tensões de fase. Após a conexão do filtro, pouca melhoria foi verificada na forma de onda das tensões da referida figura. A figura (4.78) mostra o espectro harmônico das tensões de fase, podendo-se verificar mais objetivamente a atuação do filtro, no que se diz respeito à distorção harmônica de tensão, no local de acoplamento dos filtros.

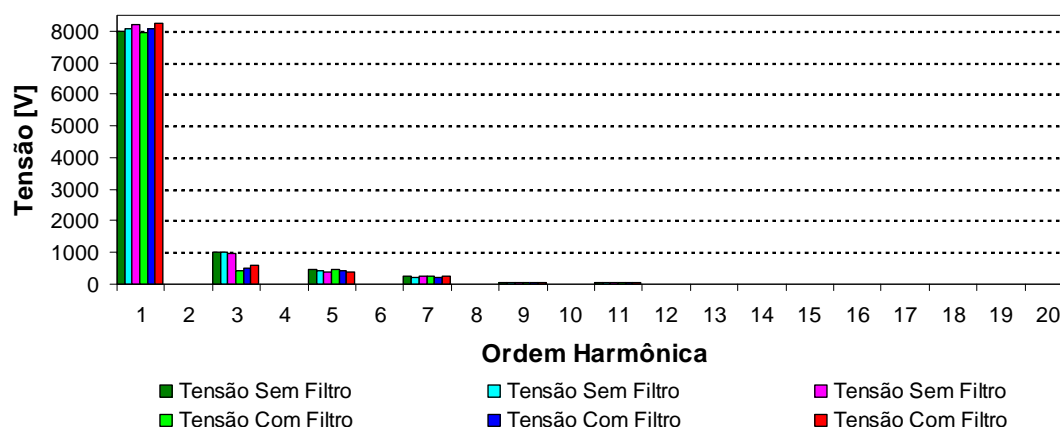


Figura 4.78 – Espectro harmônico das tensões de fase no ponto de acoplamento dos filtros, antes e após a conexão dos filtros.

Da figura (4.78) acima, verifica-se a atuação do filtro, à luz da redução da distorção harmônica de tensão no local de acoplamento dos filtros. No local avaliado, as distorções harmônicas atingiram níveis de 8,55%, 8,55% e 9,01%, nas fases A, B e C, respectivamente. Prosseguindo, a figura (4.79) mostra a interação do filtro de 3ª com o sistema, variando-se a frequência. Observa-se na fase A uma ressonância paralela na 11ª harmônica. As ressonâncias paralelas, nas frequências as quais os filtros foram sintonizados também se fazem presentes na referida figura.

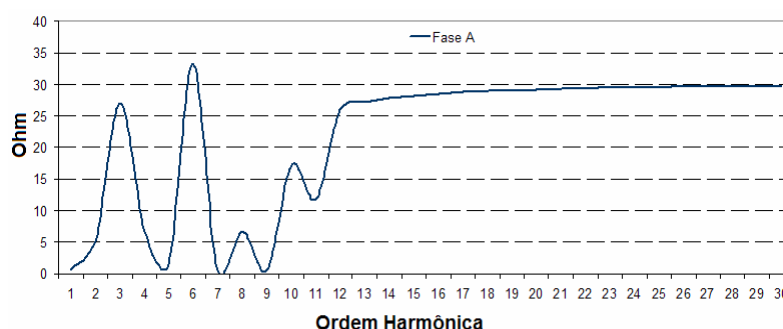
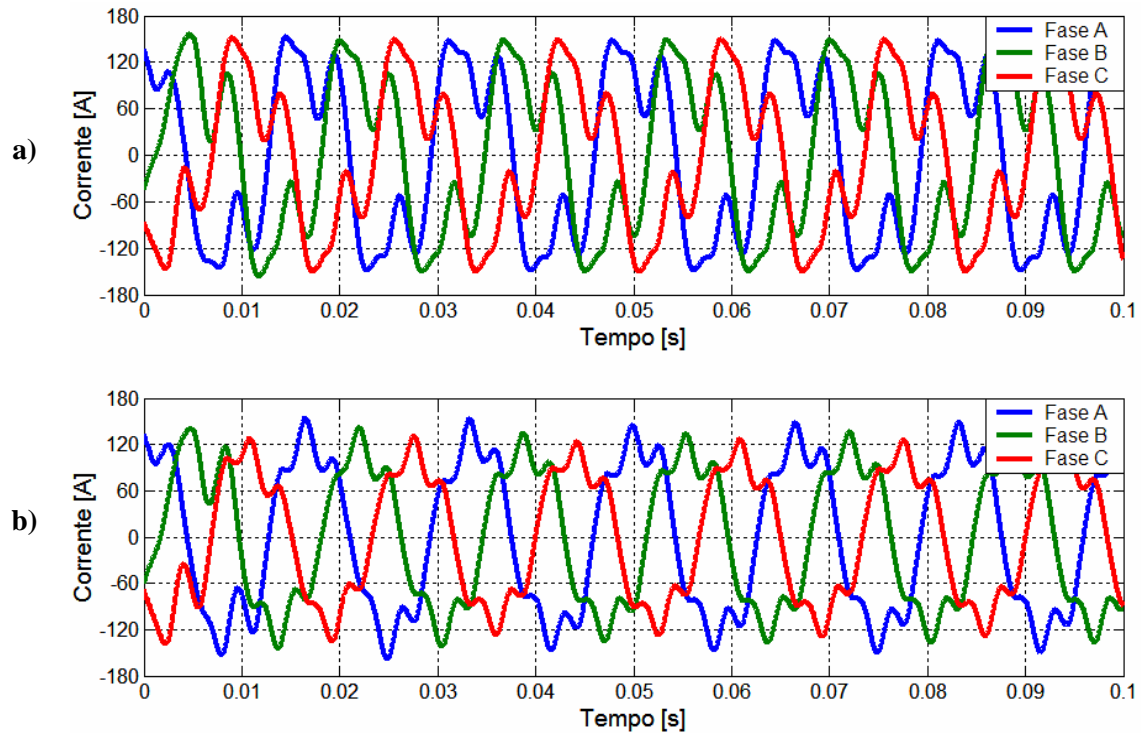


Figura 4.79 – Interação da impedância harmônica do filtro de 3ª ordem em série com o sistema devido a variação da frequência.

Já a figura (4.80) mostra as correntes de linha antes e após o acoplamento do filtro série de 3ª ordem, no local de acoplamento dos filtros. Observa-se nesta que, a forma mais



aproximada de uma senóide, mostrada na figura (4.80b), em relação à figura (4.80a), evidencia a atuação dos filtros.



*Figura 4.80 – a) Correntes de linha com o filtro de 3ª ordem. b) Correntes de linha com o filtro de 3ª ordem, no local de acoplamento dos filtros.*

Com o filtro de 3ª em série, as distorções harmônicas de corrente que, no local de acoplamento dos filtros, antes do acoplamento destes, eram de 46,67%, 49,35% e 48,28% nas fases A, B e C, respectivamente, com a atuação do referido filtro, tais distorções passaram para os níveis de 18,37%, 16,96% e 14,56%, nas fases A, B e C, respectivamente.

Na figura (4.81) é possível avaliar através da comparação os espectros harmônicos das correntes de linha do sistema antes e após a conexão do filtro de 3ª ordem no local de acoplamento dos filtros.

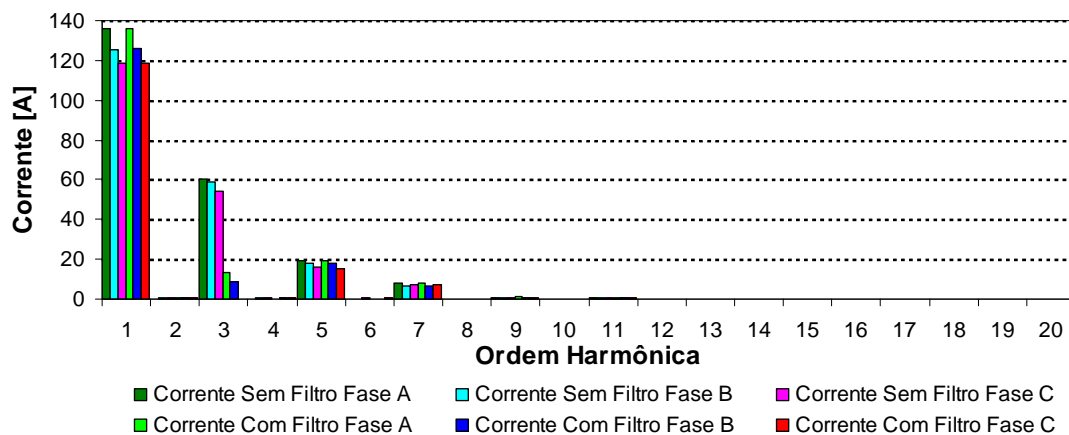


Figura 4.81 – Espectro harmônico das correntes de linha antes e após o acoplamento do filtro de 3ª ordem, em série, no local de acoplamento dos filtros.

A minimização das correntes de terceira ordem, mostradas na figura (4.81) acima, evidencia a eficiência do filtro no sistema.

É possível observar, na figura (4.82) abaixo, que as correntes de 3ª ordem, que circulavam no neutro, sofreram significativas reduções com o acoplamento do filtro de mesma ordem. Assim, a figura (4.83) mostra a oscilografia da corrente *RMS* no neutro do transformador do alimentador antes e após a conexão dos filtros de 3ª ordem.

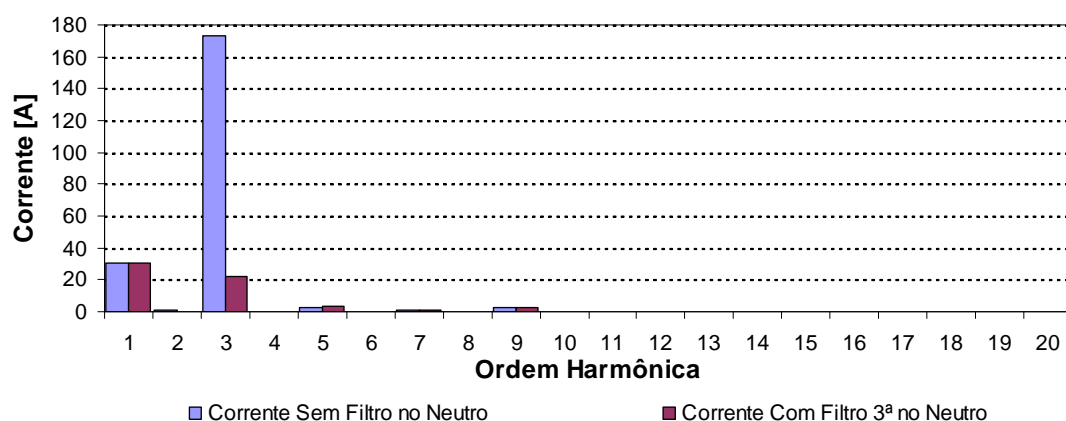


Figura 4.82 – Espectro harmônico da corrente de neutro do sistema antes e após a conexão do filtro de 3ª ordem.

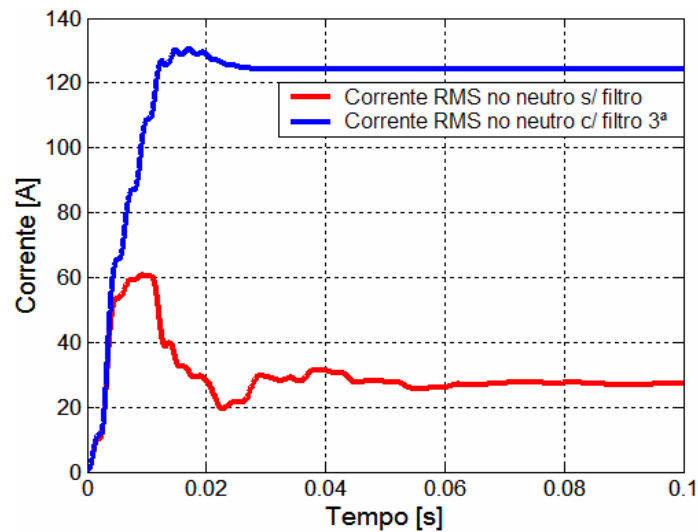


Figura 4.83 – Corrente RMS no neutro do transformador do alimentador sem e com o filtro de 3ª ordem.

A tabela (4.21) mostra como o fator de potência no local da instalação foi alterado com o acoplamento dos filtros de 3ª ordem.

Tabela 4.21 – Fator de potência, por fase, no local de acoplamento dos filtros após o acoplamento do filtro de 3ª ordem.

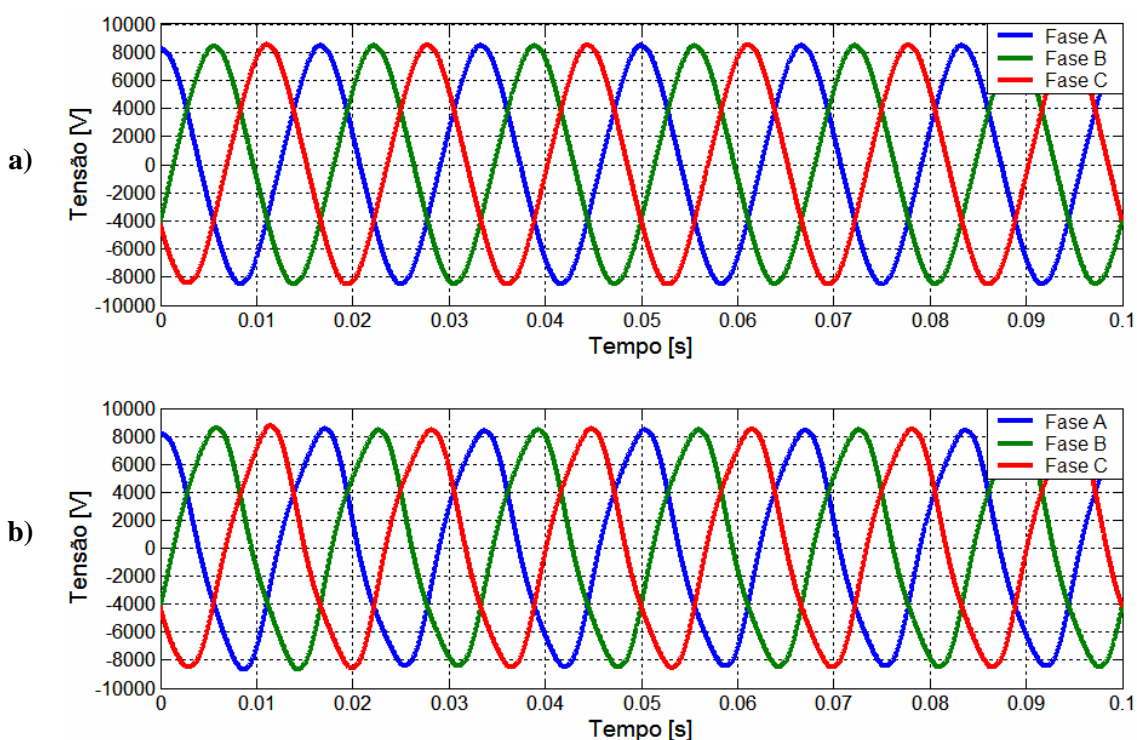
	Sem Filtro		Com Filtro	
	$\text{Cos}(\phi_1)$	$\frac{\cos \phi}{\sqrt{1+DTI^2}}$	$\text{Cos}(\phi_1)$	$\frac{\cos \phi}{\sqrt{1+DTI^2}}$
Fase A	0,99267	0,8995	0,9926	0,9763
Fase B	0,97122	0,8709	0,9713	0,9576
Fase C	0,93264	0,8398	0,9324	0,9227

A proximidade entre o fator de potência com e sem distorções harmônicas evidencia que, os sinais de tensão e corrente estão com os seus respectivos conteúdos harmônicos minimizados, pela ação do filtro de 3ª ordem.

As figuras (4.84) e (4.85) a seguir mostram, respectivamente, as formas de onda de tensões de fase e correntes de linha, na saída do alimentador, antes e após a conexão do filtro de 3ª ordem.

Observa-se na figura (4.84) que, a queda de tensão harmônica na impedância do filtro resultou no aumento da distorção harmônica total de tensão após a conexão do referido filtro. Contudo, o efeito benéfico da atuação do filtro se faz presente, com maior ênfase, sobre as correntes de linha, mostradas na figura (4.85) a seguir.

As distorções harmônicas totais de tensão que antes do acoplamento do filtro eram, nas fases A, B e C, respectivamente, de 2,57%, 2,56% e 2,54%, com a atuação do filtro, os referentes índices assumiram, para as fases A, B e C, os respectivos valores de 7,23%, 7,24% e 7,14%.



*Figura 4.84 – a) Tensões de fase antes da conexão do filtro de 3ª ordem. b) Tensões de fase após a conexão do filtro de 3ª ordem, na saída do alimentador.*

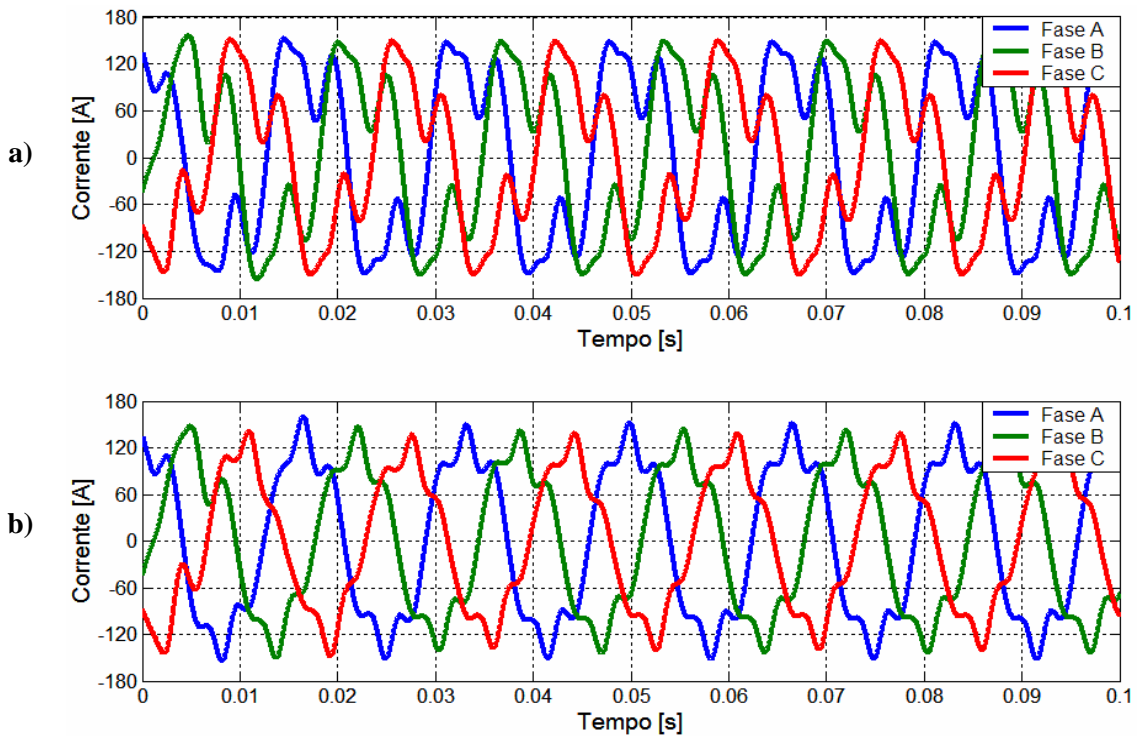


Figura 4.85 – a) Correntes de linha antes da conexão do filtro de 3ª ordem. b) Correntes de linha após a conexão do filtro de 3ª ordem, na saída do alimentador.

Os espectros harmônicos das tensões de fase, na saída do alimentador, antes e após a conexão do filtro de 3ª ordem são mostrados na figura (4.86) de forma a fornecer uma comparação entre eles.

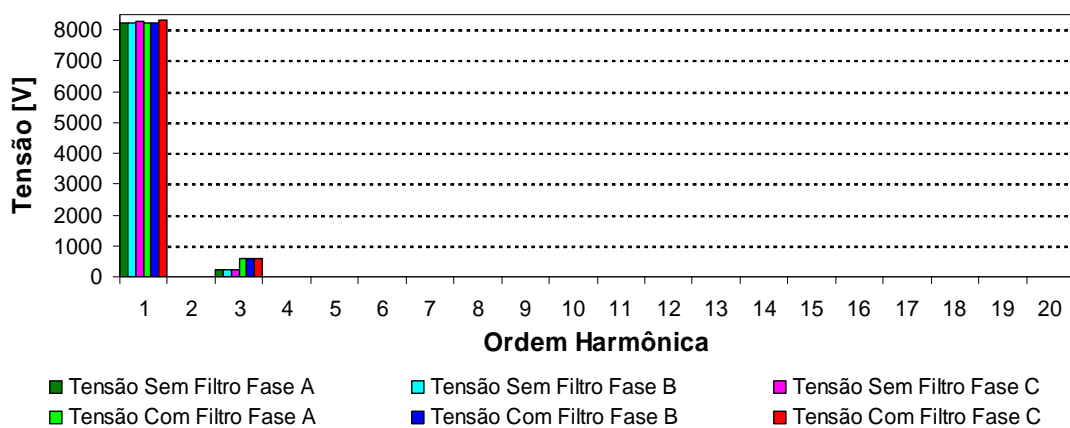


Figura 4.86 – Comparação entre os espectros harmônicos das tensões de fase sem e com a presença do filtro de 3ª ordem, na saída do alimentador.

As distorções harmônicas de corrente na saída do alimentador que, antes a conexão dos filtros eram de 44,61%, 47,44% e 47,09% nas fases A, B e C, respectivamente, tiveram, com a atuação do filtro de 3ª ordem, seus valores reduzidos para 18,32%, 16,92% e 14,52%, nas fases A, B e C, respectivamente.

Por fim, a tabela (4.22) resume a variação do fator de potência no local de acoplamento dos filtros e na saída do alimentador antes e após o acoplamento do filtro. Considerando a variação do fator de potência mostrada tabela em questão, é possível observar que o fator de potência pode ser utilizado como um indicador da qualidade da energia.

*Tabela 4.23 – Variação do fator de potência, por fase.*

	No local de Acoplamento dos Filtros				Saída do Alimentador			
	Sem Filtro		Com filtro		Sem filtro		Com filtro	
	$\cos(\phi_1)$	$\frac{\cos\phi}{\sqrt{1+DII^2}}$	$\cos(\phi_1)$	$\frac{\cos\phi}{\sqrt{1+DII^2}}$	$\cos(\phi_1)$	$\frac{\cos\phi}{\sqrt{1+DII^2}}$	$\cos(\phi_1)$	$\frac{\cos\phi}{\sqrt{1+DII^2}}$
Fase A	0,99267	0,8995	0,9926	0,9763	0,99934	0,9060	0,9999	0,9829
Fase B	0,97122	0,8709	0,9713	0,9576	0,98739	0,8859	0,9874	0,9736
Fase C	0,93264	0,8398	0,9324	0,9227	0,95802	0,8631	0,9579	0,9479

Um outro indicador muito importante em se tratando de tensões e correntes harmônicas é a distorção harmônica total. Neste sentido, a tabela (4.23) resume a variação de tais grandezas, tanto para as tensões de fase (*DTT*) e correntes de linha (*DTI*) do sistema antes e após o acoplamento dos filtros.

*Tabela 4.24 – Variação da distorção harmônica total de tensão e corrente, por fase.*

	No local de Acoplamento dos Filtros				Saída do Alimentador			
	Sem Filtro		Com filtro		Sem filtro		Com filtro	
	DTT%	DTI%	DTT%	DTI%	DTT%	DTI%	DTT%	DTI%
Fase A	14,421%	46,673%	8,55%	18,37%	2,9053%	46,536%	7,23%	18,32%
Fase B	13,897%	49,35%	8,55%	16,96%	2,9%	49,211%	7,24%	16,92%
Fase C	12,902%	48,283%	9,01%	14,56%	2,8675%	48,157%	7,14%	14,52%

Finalmente, a tabela (4.23) ilustra de forma objetiva o desempenho do filtro no sistema. Pode-se verificar que a distorção harmônica de corrente foi reduzida, em média de 28%, sendo que a topologia analisada apresentou um desempenho satisfatório, porém contribuiu para a deterioração das tensões de fase, devido à queda de tensão harmônica, sobretudo em função da alta impedância para a corrente de 3ª ordem.

#### **4.7.1 – COMENTÁRIOS GERAIS**

A simplicidade e eficiência dos filtros ressonantes, aliada à relativa simplicidade em sua modelagem e confiabilidade em seu funcionamento, fazem com que esses filtros sejam uma das soluções mais utilizadas na minimização de correntes harmônicas em sistemas de potência diversos. Os resultados das simulações objetivaram mostrar a eficiência do método de filtragem harmônica. Foi possível observar que o sistema obteve uma significativa melhora com o acoplamento do filtro de 3ª ordem. Pela observação das figuras que trazem os resultados das simulações é possível verificar que a corrente a que o filtro se propõe a minimizar teve o seu conteúdo reduzido. Entretanto, os resultados que dizem respeito à distorção harmônica total de tensão, apresentaram-se elevados, o que pode botar em questão o desempenho do filtro analisado nesta etapa desta dissertação. Os resultados obtidos mediante a análise do fator de potência e do fator de deslocamento demonstram que o filtro em série conectado no neutro do sistema, sintonizado na 3ª ordem contribuiu para a melhoria da qualidade da energia do sistema como um todo.

## **4.8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este capítulo teve o objetivo de analisar o comportamento operativo dos filtros propostos para este trabalho em um sistema de distribuição com características reais. 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. Quanto à distorção harmônica de tensão e a filtragem das demais correntes harmônicas no sistema se mantiveram elevados. Os fatores de potência juntamente com o fator de deslocamento sofreram variações consideráveis, no sentido de melhorar o desempenho do sistema em estudo.

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 total de tensão, devido a elevada queda de tensão sobre a impedância harmônica. Não é um método muito utilizado justamente devido a esta característica. Apresentou um desempenho significativo, no que se refere à melhoria no fator de potência e fator de deslocamento, e na distorção harmônica total de corrente, mas teve o seu desempenho prejudicado com a permanência de valores elevados nas distorções harmônicas totais de tensão. A possibilidade de ocorrência de ressonâncias séries e paralelas em decorrência à variação da impedância do conjunto filtro-sistema com a frequência deve ser considerada.



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. Houve uma melhora significativa na distorção harmônica total de tensão e corrente com a conexão dos filtros ao sistema. O critério econômico também deve ser levado em consideração, tendo em vista a quantidade de filtros utilizados na estrutura avaliada por esta seção. Paralelamente, a principal desvantagem deste filtro, no que diz respeito à operacionalidade, é a possibilidade de ocorrer ressonâncias séries e/ou paralelas, podendo ocorrer tensões ou correntes proibitivas se, na presença das referidas ressonâncias, o sistema apresentar alguma outra fonte de tensão ou corrente injetando neste um sinal de mesma frequência para a qual foi verificada a ressonância. Devido a este fato, o dimensionamento do filtro deve ser realizado mediante criteriosa análise de penetração harmônica, quando possível. Devido à potência do banco de capacitores necessária para absorver as correntes harmônicas ser elevada, o fator de potência no ponto de acoplamento dos filtros e na saída do alimentador apresentou-se capacitivo, manifestando-se pela elevação da tensão no ponto de acoplamento dos filtros.

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, 5ª e 7ª ordens. A operação conjunta dos dois filtros resultou na estrutura que melhor atendeu às expectativas, operando satisfatoriamente tanto na corrente quanto na tensão do sistema. Obviamente é a opção que talvez seja a mais onerosa, por se tratar de uma estrutura composta por dois tipos distintos de filtros diferentes, e essa, com certeza é a sua principal desvantagem. A possibilidade de ocorrência de ressonância entre a impedância dos filtros com a impedância do sistema, pela variação da frequência deve ser considerada, de modo que uma análise prévia de penetração

de correntes harmônicas é de extrema importância para se lograr êxito no que tange ao projeto, implementação e operação de filtros harmônicos em sistemas de potência.

Por fim, a quinta estrutura é uma modificação de parte da estrutura utilizada na seção anterior. Assim, 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 o acoplamento de apenas um filtro em série com o neutro do sistema. A melhoria no fator de potência, no fator de deslocamento e na distorção harmônica total de corrente contrasta com o fraco desempenho frente à distorção harmônica total de tensão. Por se tratar de um circuito trabalhando sintonizado, é possível que haja ressonâncias séries e/ou paralelas, em frequência que não as de interesse, podendo ocorrer tensões ou correntes proibitivas. De tal afirmativa é que se justifica um estudo prévio de penetração de correntes harmônicas, de forma a garantir um funcionamento satisfatório do sistema de filtragem utilizado.

Finalmente, para uma avaliação comparativa sucinta dos 5 estruturas de filtros aqui focalizados, a tabela (4.25) apresenta suas principais características.

---

*Tabela 4.25 – Quadro resumo dos tipos de filtros considerados e resultados obtidos com a simulação.*

---

<b>Tipo</b>	<b>Características</b>	<b>Desempenho</b>
<b>Tipo 1</b>	Filtro eletromagnético constituído por três unidades monofásicas, em zig-zag.	O filtro avaliado nesta etapa do trabalho apresentou-se como uma alternativa eficiente para a filtragem de correntes de sequência zero em sistemas trifásicos com centro estrela aterrado. Como mostrou os princípios físicos descritos no capítulo III, a característica de oferecer um caminho de baixa impedância para todas as correntes de sequência zero não é atrativo quando do seu uso em sistemas desequilibrados, à exemplo do sistema de distribuição utilizado neste trabalho. Nesta condição, se houverem tensões desequilibradas no ponto de acoplamento do filtro eletromagnético, por ele aparecerão correntes de sequência zero correspondentes.

---

<b>Tipo 2</b>	Filtro LC série sintonizado na frequência fundamental, em série com a linha.	A forte atuação na atenuação das correntes harmônicas acima da corrente fundamental (60 Hz) foi evidenciada nos resultados das simulações, onde foi possível verificar que tanto a corrente no neutro do transformador, quanto as correntes de linha do sistema tiveram o seu conteúdo harmônico completamente eliminado, constatando assim a eficiência do filtro avaliado nesta etapa. Contudo, devido a queda de tensão harmônica na impedância harmônica no filtro, a distorção harmônica de tensão permaneceu com níveis elevados, o que demonstrou ser a maior desvantagem no que diz respeito à utilização deste tipo de filtro. Concluindo, a utilização deste método de filtragem não é recomendada em sistemas onde o fluxo de correntes harmônicas é elevado.
<b>Tipo 3</b>	Filtro LC série sintonizado nas frequências de 3ª e 5ª ordens, em derivação.	Os filtros série, em derivação com a carga tiveram o seu desempenho aqui avaliados. Os resultados das simulações demonstraram que a atuação dos filtros, no que diz respeito à minimização do fluxo de correntes harmônicas para os quais foram sintonizados, foi satisfatória. A relativa simplicidade em sua modelagem, aliada a confiabilidade e robustez, faz com que esta estrutura de filtro seja a mais difundida nas aplicações em sistemas de potência em geral. Entretanto, os resultados demonstraram que houve um sensível aumento na corrente fundamental do sistema, devido à elevada potência dos filtros utilizados. Outro reflexo da potência do banco de filtros utilizados se fez presente na tensão do local de acoplamento dos filtros, que teve o valor da tensão aumentado, evidenciando um fator de potência capacitivo. O efeito da dessintonização também pode ser entendido como uma desvantagem ao seu uso, mas que pode ser minimizado levando-se em conta nos cálculos. Os resultados levaram a concluir que os filtros em questão podem ser uma alternativa para a minimização do fluxo de correntes de sequência zero em sistemas de distribuição.
<b>Tipo 4</b>	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.	A operação conjunta de filtros paralelos, em série com a linha, e filtros série, em derivação com a carga foi avaliada nesta etapa do trabalho. Com os resultados obtidos pela simulação conclui-se que a topologia proposta é muito atrativa, sob o ponto de vista técnico. Entretanto, sob a óptica financeira, não é tão viável, devido ao fato da quantidade de filtros adotada. Outro fator a se levar em consideração é a possibilidade de ressonância, conforme avaliado nesta seção. Os resultados atingidos na minimização dos índices de distorção harmônica de tensão e de corrente levam a concluir que esta estrutura proposta foi que mais se destacou. Destaca-se também a atuação do esquema para o balanço das fases do sistema.
<b>Tipo 5</b>	Filtro LC paralelo sintonizado na 3ª harmônica, conectado em série com o neutro do sistema.	E por fim, a estrutura aqui analisada foi um filtro paralelo, em série com o condutor neutro, sintonizado na 3ª ordem, de forma a oferecer uma alta impedância à corrente a que

---

este foi sintonizado. Com isso, o fluxo de correntes de 3ª ordem no neutro foi fortemente reduzido, consequentemente, a corrente de 3ª ordem nas fases também foi reduzida.

Um atrativo à utilização de tais filtros é a possibilidade destes serem implantados com a utilização de um reator de aterramento pré-existente no transformador, resultando em economia financeira no processo de aquisição do filtro. A desvantagem quando da utilização desta estrutura se faz presente na distorção harmônica de tensão, ocasionada pelo deslocamento de neutro, devido a queda de tensão harmônica na impedância harmônica do filtro. Conclui-se, então, que o presente filtro é uma estratégia interessante para o propósito de minimização de correntes de sequência zero em sistemas trifásicos a quatro fios.

---

Diante do exposto, e tendo sido obtido os resultados a que esta dissertação se propôs a discutir, é dada sequência dos trabalhos com as conclusões finais, no capítulo V, a seguir.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSÕES FINAIS**

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

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

- O capítulo I objetivou contextualizar as premissas do trabalho no seu desenvolvimento, informando os objetivos a serem alcançados, a relevância do trabalho, a metodologia, as contribuições oferecidas por esta dissertação e a estrutura na qual foi desenvolvida esta pesquisa.
- O capítulo II contemplou, especificamente, os conceitos básicos sobre qualidade da energia, correntes harmônicas, como estas são geradas e como elas afetam os equipamentos acoplados ao sistema elétrico. Um breve comentário sobre como os principais equipamentos presentes no sistema elétrico são afetados pela presença de tensões e/ou correntes harmônicas também foi discorrido aqui. Uma introdução, apesar de sucinta, mas consistente sobre as particularidades das correntes de sequência

zero foi aqui desenvolvida. O estado da arte sobre o assunto também foi tratado nesse capítulo.

- O capítulo III concentrou-se na análise do princípio operativo dos filtros propostos, e suas respectivas modelagens computacionais, no que tange ao funcionamento em um sistema teste ideal, ou seja, com uma fonte de corrente harmônica trifásica, simétrica e equilibrada. Foram cinco as estruturas contempladas nessa etapa do desenvolvimento dos trabalhos. A primeira estrutura foi o filtro eletromagnético, constituído por três unidades monofásicas, interconectadas de forma a resultar em uma ligação em zig-zag. Os resultados obtidos com a simulação mostraram que o sistema proposto é muito eficiente no que se propõe. 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. Sua característica principal é a seletividade com relação à corrente. Em contrapartida, teve a sua eficiência prejudicada, levando em consideração o efeito da queda de tensão harmônica nos filtros, ocasionando a permanência de elevados índices de distorção harmônica de tensão no lado da carga. 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 entre a impedância do filtro e a impedância do sistema, com a variação da frequência. 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 paralelos, em série sintonizados nas frequências de 3ª e 9ª ordens, e

filtros série, em derivação nas frequências de 3ª e 5ª ordens. A operação conjunta desses filtros resultou na estrutura que melhor atendeu às expectativas, operando satisfatoriamente na minimização da distorção harmônica de tensão e corrente 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 constituída por um filtro de terceira ordem acoplado ao neutro do sistema, de forma a oferecer alta impedância para a corrente na frequência a qual ele foi sintonizado. A principal vantagem desta estrutura é a economia que se obtém com o acoplamento de apenas um filtro em série com o neutro do sistema, tendo como desvantagem o deslocamento da tensão de neutro, ocasionado pela queda de tensão harmônica no filtro.

- O capítulo IV foi centrado no processo de simulação e análise do comportamento operativo dos tipos de filtros propostos nesta dissertação em um sistema de distribuição. O sistema de distribuição em questão foi modelado de acordo com parâmetros fornecidos pela concessionária de energia elétrica ESCELSA, do Espírito Santo. A primeira estrutura avaliada foi um banco de três transformadores monofásicos interconectados em zig-zag. Os resultados foram satisfatórios no que diz respeito à minimização da circulação das correntes de sequência zero no neutro e nas fases do sistema. Quanto à distorção harmônica de tensão e a filtragem das demais correntes harmônicas no sistema se mantiveram elevados. Os fatores de potência e de deslocamento sofreram variações consideráveis, no sentido de melhorar o desempenho do sistema em estudo. A segunda estrutura avaliada foi um filtro harmônico conectado em série e sintonizado na frequência fundamental do sistema (60 Hz). A principal vantagem desse filtro é a sua grande seletividade com relação à corrente, mas obteve um baixo rendimento no que tange à distorção harmônica total de tensão, devido a

elevada queda de tensão sobre a impedância harmônica. Não é um método muito utilizado justamente devido a esta característica. Apresentou um desempenho significativo, no que se refere à melhoria no fator de potência e fator de deslocamento, e na distorção harmônica total de corrente, mas os elevados níveis de distorção harmônica de tensão prejudicaram o seu desempenho. A possibilidade de ocorrência de ressonâncias séries e paralelas em decorrência da variação da impedância do conjunto filtro-sistema com a frequência deve ser considerada. A terceira estrutura considerada é composta por filtros harmônicos sintonizados em derivação. 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. Houve uma melhora significativa na distorção harmônica total de tensão e corrente com a conexão dos filtros ao sistema. O critério econômico também deve ser levado em consideração, tendo em vista a quantidade de filtros utilizados na estrutura avaliada por esta seção. Paralelamente, a principal desvantagem deste filtro, no que diz respeito à operacionalidade, é a possibilidade de ocorrer ressonâncias séries e/ou paralelas. Devido a este fato, o dimensionamento do filtro deve ser realizado mediante criteriosa análise de penetração harmônica, quando possível. Por consequência da potência do banco de capacitores necessária para absorver as correntes harmônicas ser elevada, o fator de potência no ponto de acoplamento dos filtros e na saída do alimentador apresentou-se capacitivo, manifestando-se pela elevação da tensão no ponto de acoplamento dos filtros. A quarta estrutura foi concebida pela junção dos filtros paralelos, em série com a linha, sintonizados nas frequências de 3ª e 9ª ordens, e em derivação nas frequências de 3ª, 5ª e 7ª ordens. A operação conjunta de duas filosofias de filtragem 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. A possibilidade de ocorrência de ressonância entre a impedância dos filtros com a impedância do sistema, pela variação da frequência deve ser considerada, de modo que, uma análise prévia de penetração de correntes harmônicas é de extrema importância para se lograr êxito no que tange ao projeto, implementação e operação de filtros harmônicos em sistemas de potência. E por fim, a quinta estrutura é constituída por um filtro paralelo, de terceira ordem acoplado ao neutro do sistema, de forma a oferecer alta impedância para a corrente na frequência a qual ele foi sintonizado. A principal vantagem desta estrutura é a economia que se obtém com o acoplamento de apenas um filtro em série com o neutro do sistema. A melhoria no fator de potência, no fator de deslocamento e na distorção harmônica total de corrente contrasta com o fraco desempenho frente à distorção harmônica total de tensão. Por se tratar de um circuito sintonizado, é possível que haja ressonâncias séries e/ou paralelas, em frequência que não as de interesse, podendo ocorrer tensões ou correntes proibitivas. De tal afirmativa é que se justifica um estudo prévio de penetração de correntes harmônicas, de forma a garantir um funcionamento satisfatório do sistema de filtragem utilizado.

Finalmente, a pesquisa objetivou demonstrar a exequibilidade técnica da utilização dos dispositivos eletromagnéticos e passivos LC para fins de atenuação das distorções harmônicas de tensão e corrente, em sistemas de distribuição, em média tensão, a quatro fios. Todos os tipos de filtros contemplados por esta dissertação mostraram-se eficientes, no que tange a seus propósitos, porém, os filtros LC detêm uma vantagem significativa, em relação aos filtros eletromagnéticos, que é expressa pela existência prévia de capacitores no sistema, podendo

estes serem utilizados na construção dos filtros, acarretando um menor custo inicial para a empresa.

Deve-se salientar que o trabalho aqui documentado reflete um primeiro passo na direção da determinação da estrutura que melhor se adapte ao sistema em estudo, apresentando distorções harmônicas de tensão e/ou corrente e suas possíveis consequências.

Para tanto, dentre outros aspectos não contemplados nesta dissertação, reconhece-se a necessidade de maiores avanços, em investigações futuras, quanto aos seguintes pontos:

- Análise econômica das estruturas avaliadas, objetivando a determinação do custo inicial global da implantação da estrutura de filtragem;
- Análise econômica para a determinação do custo evitado com a utilização de cada estrutura contemplada por esta dissertação, e tempo de retorno do investimento;
- Verificação, por meio de protótipos ou simulação das condições físicas de operação das estruturas, objetivando detectar possíveis não conformidades de funcionamento, como ruídos audíveis, no caso de estruturas eletromagnéticas;
- Transitórios eletromagnéticos decorrentes do chaveamento das estruturas na rede elétrica;
- Desempenho dos tipos propostos frente à situações de contingência, à exemplo de curto-circuito monofásico e trifásicos e defeitos nos braços dos filtros;
- Um estudo de alocação ótima dos filtros no sistema também pode ser realizado, com vistas à determinar qual a localização a ser instalado o filtro para a otimização de seu desempenho no sistema.

## CAPÍTULO VI

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] – Dugan, R., M. F. McGranaghan, H. W. Beaty, “Electrical Power System Quality”, 2º ed. McGraw-Hill, USA, 2002.
  
- [2] – Módulo 8 dos *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST*, agosto/setembro 2006.
  
- [3] – Sub-Módulo 2.2 dos *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST*, agosto/setembro 2006.
  
- [4] – Femia, N.; Vitelli, M., “Resistive losses of conductors carrying SMPS current waveforms”, Industrial Electronics, 2002. ISIE 2002. Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Volume 3, 26-29 May 2002 pp. V-852 - V-855 vol.5.
  
- [5] – Gardinier, R. E., “Cost impacts of implementing the IEC harmonic limits”, Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, IEEE Volume 2, 31 Jan-4 Feb 1999 pp. 1102 - 1103 vol.2

- [6] – Mei, S.; Ismail, Y.I., “Modeling skin effect with reduced decoupled R-L circuits”, Circuits and Systems, 2003. ISCAS '03. Proceedings of the 2003 International Symposium on Volume 4, 25-28 May 2003 pp.IV-588 - IV-591 vol.4.
- [7] – de Abreu, J.P.G.; de Sa, J.S.; Prado, C.C., “Harmonic torques in three-phase induction motors supplied by nonsinusoidal voltages”, Harmonics and Quality of Power, 2004. 11th International Conference on 12-15 Sept. 2004 pp.652 – 657.
- [8] – De Camargo, J. M., Análises do desempenho térmico e vida útil de transformadores alimentando cargas não lineares, Uberlândia: UFU, 2005 (Dissertação, Mestrado)
- [9] – Eggleston, J.F.; Arrillaga, J.; Semlyen, A., “Analysis of the harmonic distortion resulting from the interaction between synchronous machines and HVDC convertors”, Power Delivery, IEEE Transactions on Volume 3, Issue 1, Jan. 1988 Pp.325 – 332.
- [10] – Kneschke, T.A., “Distortion and power factor of nonlinear loads”;Railroad Conference, 1999. Proceedings of the 1999 ASME/IEEE Joint13-15 April 1999 Pp.47 – 54.
- [11] –Schonek, Jacques, “The singularities of the third Harmonic”, Edition: Schneider Electric. <http://www.schneider-electric.com>.
- [12] – Shih-Min Hsu, “Reactive power compensator with harmonic blocking feature”, System Theory, 1996., Proceedings of the Twenty-Eighth Southeastern Symposium on 31 March-2 April 1996 Pp.206 – 210.

- [13] – Zanotto, L.; Piovan, R.; Toigo, V.; Gaio, E.; Bordignon, P.; Consani, T.; Fracchia, M., “Filter design for harmonic reduction in high-voltage booster for railway applications”, Power Delivery, IEEE Transactions on Volume 20, Issue 1, Jan 2005 Pp.258 – 263.
- [14] – Czarnecki, L.S.; Ginn, H.L., III, “The effect of the design method on efficiency of resonant harmonic filters”, Power Delivery, IEEE Transactions on Volume 20, Issue 1, Jan 2005 Pp.286 – 291.
- [15] – Key, T.; Jih-Sheng Lai, “Analysis of harmonic mitigation methods for building wiring systems”, Power Systems, IEEE Transactions on Volume 13, Issue 3, Aug. 1998 Pp.890 – 897.
- [16] – Makram, E.B.; Subramaniam, E.V.; Girgis, A.A.; Catoe, R.C., Jr., “Harmonic filter design using actual recorded data”, Industry Applications, IEEE Transactions on Volume 29, Issue 6, Nov.-Dec. 1993 Pp.1176 – 1183.
- [17] – Zaninelli, D., “Nonlinear passive filters in power systems”, Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE Volume 2, 16-20 July 2000 Pp.773 - 777 vol. 2.
- [18] – Das, J.C., “Passive filters - potentialities and limitations”, Industry Applications, IEEE Transactions on Volume 40, Issue 1, Jan.-Feb. 2004 Pp.232 – 241.

- [19] – Zobaa, A.F., “The optimal passive filters to minimize voltage harmonic distortion at a load bus”, Power Delivery, IEEE Transactions on Volume 20, Issue 2, Part 2, April 2005 Pp.1592 – 1597.
- [20] – Yousif, S.N.A.L.; Wanik, M.Z.C.; Mohamed, A., “Implementation of different passive filter designs for harmonic mitigation”, Power and Energy Conference, 2004. PECon 2004. Proceedings. National 29-30 Nov. 2004 Pp.229 – 234.
- [21] – Emanuel, A.E.; Orr, J.A., “The effect of neutral path impedance on voltage and current distortion. Part I. symmetrical and balanced three-phase systems”, Harmonics and Quality of Power, 2004. 11th International Conference on 12-15 Sept. 2004 Pp.186 – 190.
- [22] – Emanuel, A.E.; Orr, J.A., “The effect of neutral path impedance on voltage and current distortion. Part II. Imbalanced three-phase systems”, Harmonics and Quality of Power, 2004. 11th International Conference on 12-15 Sept. 2004 Pp.180 – 185.
- [23] – Belchior, F.N.; Ferreira, J.F.V.; Oliveira, J.C.; Apolonio, R.; Vasconcellos, A.B., “Three-phase electromagnetic filter for zero-sequence harmonics”, Magnetics, IEEE Transactions on Volume 42, Issue 9, Sept. 2006 Pp.2201 – 2207.
- [24] – Belchior, F.N.; Oliveira, J.C.; Apolonio, R.; Vasconcellos, A.B.” Operação conjunta: filtro e bloqueador eletromagnético para harmônicas de sequência zero”, VI SBQEE – Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, Belém – Pará – Brasil.

- [25] – Syafrudin, M.; Hadzer, C.M.; Sutanto, J., “Zero-sequence harmonics current minimization using zero-blocking transformer and shunt LC passive filters”, Power System Technology, 2002. Proceedings. PowerCon 2002. International Conference on Volume 1, 13-17 Oct. 2002 Pp.116 - 120 vol.1.
- [26] – Dahono, P.A.; Widjaya, R.E.; Syafrudin; Qamaruzzaman, “A practical approach to minimize the zero-sequence current harmonics in power distribution systems”, Power Conversion Conference - Nagaoka 1997, Proceedings of the Volume 2, 3-6 Aug. 1997 Pp.683 - 686 vol.2.
- [27] – Hurng-Liahng Jou; Jinn-Chang Wu; Kuen-Der Wu; Wen-Jung Chiang; Yi-Hsun Chen, “Analysis of zig-zag transformer applying in the three-phase four-wire distribution power system”, Power Delivery, IEEE Transactions on Volume 20, Issue 2, Part 1, April 2005 Pp.1168 – 1173.
- [28] – Detjen, E.R.; Shah, K.R., “Grounding transformer applications and associated protection schemes”, Industry Applications, IEEE Transactions on Volume 28, Issue 4, July-Aug. 1992 Page (s):788 – 796.
- [29] – Barnes, R.H., “Telephone interference problem caused by generator triplen harmonic earth currents on an island system”, Safeguarding Industrial Plant During Power System Disturbances, IEE Colloquium on 4 Dec 1989 Pp.9/1 – 910.

- [30] – Mahamad, N.; Hadzer, C.M.; Masri, S., “Application of LC filter in harmonics reduction”, Power and Energy Conference, 2004. PECon 2004. Proceedings. National 29-30 Nov. 2004 Pp.268 – 271.
- [31] – Hadzer, C.M.; Masri, S.; Mahamad, N., “A study on zero-passing transformer in harmonics reduction”, Power Engineering Conference, 2003. PECon 2003. Proceedings. National 15-16 Dec. 2003 Pp.180 – 184.
- [32] – Ashari, M.; Nayar, C.V.; Islam, S., “Mitigation of line and neutral current harmonics in three-phase distribution systems”, Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE Volume 5, 8-12 Oct. 2000 Pp.3166 - 3171 vol.5.
- [33] – ZhanFeng Deng; XinJian Jiang; DongQi Zhu, “A novel hybrid filter to cancel the neutral harmonic current”, Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the Volume 1, 13-18 Oct. 2002 Pp.59 - 63 vol.1.
- [34] – Po-Tai Cheng; Yung-Fu Huang; Chung-Chuan Hou, “Design of a neutral harmonic mitigator for three-phase four-wire distribution systems”, Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE Volume 1, 30 Sept.-4 Oct. 2001 Pp.164 - 171 vol.1.
- [35] – Sensarma, P.S.; Padiyar, K.R.; Ramanarayanan, V., “A comparative study of harmonic filtering strategies for a shunt active filter”, Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE Volume 4, 8-12 Oct. 2000 Pp.2509 - 2516 vol.4.



- [36] – Kim, S., “Active zero-sequence cancellation technique in unbalanced commercial building power system”, Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04. Nineteenth Annual IEEE Volume 1, 2004 Pp.185 - 190 Vol.1.
- [37] – Rivas, D.; Moran, L.; Dixon, J.W.; Espinoza, J.R., “Improving passive filter compensation performance with active techniques”, Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume 50, Issue 1, Feb. 2003 Pp.161 - 170
- [38] – Dayi Li; Qiaofu Chen; Zhengchun Jia; Jianxing Ke, “A novel active power filter with fundamental magnetic flux compensation” , Power Delivery, IEEE Transactions on Volume 19, Issue 2, April 2004 Pp.799 - 805
- [39] – Tong Xiangqian; Xu Jin; Wu Wenjun; Xue Junyi, “Active reactor based on harmonic magnetic flux compensation”, Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on Volume 3, 27-29 Sept. 2005 Pp.1750 - 1754 Vol. 3
- [40] – Depenbrock, M.; Staudt, V., “The FBD-method as tool for compensating total nonactive currents”, Harmonics And Quality of Power, 1998. Proceedings. 8th International Conference on Volume 1, 14-16 Oct. 1998 Pp.320 - 324 vol.1
- [41] – Akagi, H., “Active harmonic filters”, Proceedings of the IEEE Volume 93, Issue 12, Dec. 2005 Pp.2128 - 2141

- [42] – Akagi, H., “New trends in active filters for power conditioning”, Industry Applications, IEEE Transactions on Volume 32, Issue 6, Nov.-Dec. 1996 Pp.1312 - 1322
  
- [43] – Watanabe, E.H.; Aredes, M., “Power quality considerations on shunt/series current and voltage conditioners”, Harmonics and Quality of Power, 2002. 10th International Conference on Volume 2, 2002 Pp.595 - 600 vol.2
  
- [44] – Aredes, M.; Heumann, K.; Watanabe, E.H., “An universal active power line conditioner”, Power Delivery, IEEE Transactions on Volume 13, Issue 2, April 1998 Pp.545 - 551
  
- [45] – Peng, F.Z.; Akagi, H.; Nabae, A., “Compensation characteristics of the combined system of shunt passive and series active filters”, Industry Applications, IEEE Transactions on Volume 29, Issue 1, Part 1, Jan.-Feb. 1993 Pp.144 - 152
  
- [46] – Peng, F.Z.; Akagi, H.; Nabae, A., “A new approach to harmonic compensation in power systems”, Industry Applications Society Annual Meeting, 1988., Conference Record of the 1988 IEEE 2-7 Oct. 1988 Pp.874 - 880 vol.1
  
- [47] – Ling, P. J. A., “Designing Modern Electrical Systems With Transformers That Inherently Reduce Harmonic Distortion in a Pc-Rich Environment”, powerSmiths International Corporation, 416-439 – 1077, pp. 1-13, 2000

- [48] – Khera, P.P., “Application of zigzag transformers for reducing harmonics in the neutral conductor of low voltage distribution system”, Industry Applications Society Annual Meeting, 1990., Conference Record of the 1990 IEEE 7-12 Oct. 1990 Pp.1092 vol.2
- [49] – Sikyung Kim; Enjeti, P.N.; Pitel, I.J., A New Approach to Improve Power factor and Reduce Harmonics in a Three-Phase Diode Rectifier Type Utility Interface”, Industry Applications, IEEE Transactions on Volume 30, Issue 6, Nov. 1994 Pp.1557.
- [50] – Meza, J.C.; Samra, A.H., “A new technique to reduce line-current harmonics generated by a three-phase bridge rectifier”, Southeastcon '98. Proceedings. IEEE 24-26 April 1998 Pp.354 – 359
- [51] – Alternative Transients Program Rule Book. 1987. Leuven EMTP Center.
- [52] – Simon Lai, Norman Tse, Peter Wong, L. L. Lai, “Analysis of zero sequence passive filter harmonics mitigation device for building wiring system”, Power System Management and Control, 17-19 April 2002, Conference Publication n° 488, IEE
- [53] – T. A. Raghavendiran, Thiruvengadam, K. Udayakumar, “ Designing Filter for Harmonic Suppression for Industrial Plant as Per IEEE – 519 Standard.”, Proceedings of IEEE TENCON '02.
- [54] – Fang Z. Peng, “Harmonic Sources and Filtering Approaches”, IEEE Industry Applications Magazine – July/August 2001.

- [55] – Boylestad, Robert L., “Introdução à análise de circuitos 10<sup>a</sup> edição” Editora Prentice Hall
- [56] – G. W. Chang, M. J. Chiu, K. S. Lee, Y. F. Hsu, “Analysis of High Neutral Current in Three-Phase Four-Wire Multi-Grounded Distribution Feeders”, Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003 IEEE PES, 531- 535 vol.2, 7-12 Sept. 2003.

## ANEXO

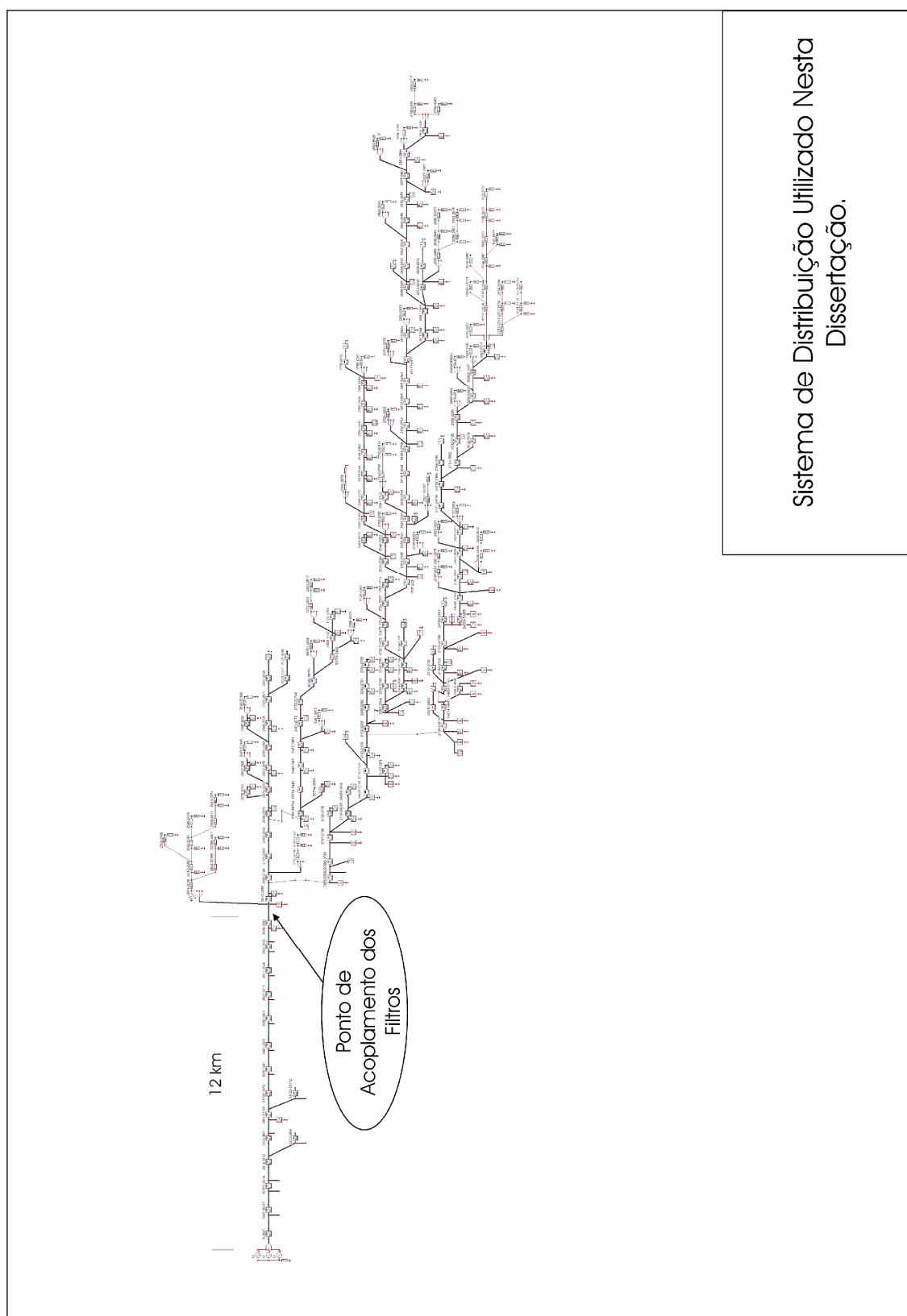
Rotina em MATLAB para o cálculo dos parâmetros do banco de transformador, em função da potência deste e dos valores obtidos em ensaios de curto-circuito e em vazio.

```
%Este programa calcula os parâmetros de um transformador em função dos dados dos ensaios de curto-circuito e em vazio.
%Os dados envolvidos são:
%Dados do teste a vazio
% Vo=Tensão em vazio em volts;
% Io=Corrente a vazio em amperes;
% Po=Potência a vazio em watts;
%Dados do teste em curto-circuito
% Vs=Tensão em curto circuito em volts;
% Is=Corrente em curto-circuito em amperes;
% Ps=Potência em curto-circuito em watts;
clear all;
clc;
disp('*****')
disp('CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE UM TRANSFORMADOR EM FUNÇÃO DOS RESULTADOS')
disp('DOS ENSAIOS EM VAZIO E CURTO-CIRCUITO.')
disp('*****')
n=0;
while n~=1&n~=3
    %O usuário deve informar o tipo de transformador. Monofásico ou trifásico.
    clc;
    disp('*****')
    disp('CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE UM TRANSFORMADOR EM FUNÇÃO DOS RESULTADOS')
    disp('DOS ENSAIOS A VAZIO E CURTO-CIRCUITO.')
    disp('*****')
    n=input('Entre com o número de fases do transformador (1 ou 3): ');
    if n~=1&n~=3
        fprintf('\nInforme um número entre 1 e 3, que corresponde ao numero de')
        fprintf('\nfases do transformador. Para transformadores bifásicos admitir')
        fprintf('\ncomo monofásico, e inserir os dados com as devidas modificações.')
        disp(' ')
        disp(' ')
        disp('Aperte qualquer tecla para continuar. ');
        pause
    end
end
%O usuário deve informar os dados do ensaio a vazio do transformador em estudo.
S=input('\nInforme a potência do transformador, em VA: ');
fprintf('\nInforme os dados do teste em vazio:\n');
Vo=input('Informe a tensão do ensaio em vazio, em volts: ');
Io=input('Informe a corrente do ensaio a vazio, em amperes: ');
Po=input('Informe a potencia do ensaio a vazio, em watts: ');
%Encontrando a resistência de magnetização para potência monofásica.
Rm=(Vo/sqrt(n))^2/(Po/n);
fprintf('\nA resistência de magnetização vale:%g ohms', Rm);
%Encontrando a admitância de magnetização.
Ym=Io/(Vo/sqrt(n));
```

```
%Extraindo a reatância de magnetização.
Xm=1/sqrt(Ym^2-1/Rm^2);
fprintf('\nA reatância de magnetização vale:%g ohms', Xm);

%O usuário deve informar os dados do ensaio a vazio do transformador em estudo.
disp(' ');
fprintf('\nInforme os dados do teste de curto-circuito:\n');
Vs=input('Informe a tensão do ensaio de curto-circuito, em volts: ');
Is=input('Informe a corrente do ensaio de curto-circuito, em amperes: ');
Ps=input('Informe a potencia do ensaio de curto-circuito, em watts: ');
%Encontrando a resistencia serie do enrolamento para potencia monofasica.
Rs=((Ps/n)/Is^2)/2;
fprintf('\nA resistência do enrolamento, por fase, vale:%g ohms', Rs);
%Encontrando a magnitude da impedância série do enrolamento.
%A tensão tem que ser mudada para tensão fase-neutro.
Zs=(Vs/sqrt(n))/Is;
%Encontrando a reatância série do transformador.
Xs=(sqrt(Zs^2-Rs^2))/2;
fprintf('\nA reatância do enrolamento, por fase, vale:%g ohms', Xs);
%Encontrando a indutância por fase do transformador.
L=(Xs/377)*1000;
fprintf('\nA indutância do enrolamento, por fase, vale:%g mH', L);
```

Diagrama do sistema de distribuição utilizado nesta dissertação.



## Dados do sistema de distribuição utilizado nesta dissertação.

DADOS DE BARRA										DADOS DE LINHA										
INIC	FIM	V	KW	KVAR	CKVAR	Fases	Cabo	EXT (km)	R1 (Ohms)	X1 (Ohms)	R1 (pu)	X1 (pu)	I	I-MX	CR	CHV	I(F)	KW	KVAR	CKVAR
6002	1678	13757	16	13	0	3	S04	0,17	0,27166	0,08942	0,14265	0,04695	1	116	0,8	GU0513	0,7	16	13	0
50280	1681	13647	18	15	0	3	"	1,04	1,66192	0,54704	0,87267	0,28725	7	116	6		5,3	120	102	0
1681	1695	13647	9	8	0	1	A04	0,2	0,306	0,098	0,16068	0,05146	2	118	1,6	GU0515	1,5	9	8	0
1724	1707	14006	0	0	0	3	A10	0,44	0,2662	0,19888	0,13978	0,10443	52	214	24,3		40	974	814	0
1707	1711	14006	19	16	0	3	A04	0,04	0,0612	0,0196	0,03214	0,01029	1	118	0,8	GU0524	0,7	19	16	0
51072	1724	14033	0	0	0	3	A10	0,2	0,121	0,0904	0,06354	0,04747	52	214	24,3		40	977	817	0
2687	1738	14061	0	0	300	3	A10	0,13	0,07865	0,05876	0,04130	0,03085	46	214	21,5	GU0625	35,3	986	824	300
1738	1741	14061	9	7	0	3	S04	0,12	0,19176	0,06312	0,10069	0,03314	0	116	0	GU0600	0	9	7	0
2409	1755	13743	9	8	0	3	S02	0,73	0,7665	0,38617	0,40249	0,20278	1	154	0,6		0,7	23	20	0
1755	1769	13743	6	5	0	1	S04	0,68	1,08664	0,35768	0,57059	0,18782	1	116	0,8	GU0523	0,7	6	5	0
2488	1772	13113	25	20	0	3	S04	2,29	3,65942	1,20454	1,92156	0,63250	6	116	5,1	GU0586	4,6	100	82	0
1772	1786	13113	21	17	0	3	S04	0,92	1,47016	0,48392	0,77198	0,25411	1	116	0,8	GU0602	0,7	21	17	0
1801	1790	13523	5	4	0	1	S04	2,39	3,81922	1,25714	2,00547	0,66012	3	116	2,5		2,3	18	16	0
2244	1801	13564	4	3	0	1	S04	0,44	0,70312	0,23144	0,36921	0,12153	5	116	4,3		3,8	28	24	0
1801	1815	13564	6	5	0	1	S04	0,88	1,40624	0,46088	0,73842	0,24306	1	116	0,8	GU0604	0,7	6	5	0
50077	2014	14300	0	0	0	3	S33	0,01	0,0019	0,00396	0,00100	0,00208	130	453	28,7	GU0550	100	2956	2463	1200
2031	2028	13403	4	3	0	3	S10	0,98	0,68208	0,51352	0,35816	0,26965	0	202	0		0	4	3	0
3725	2031	13403	0	0	0	3	S10	0,7	0,4872	0,3668	0,25583	0,19261	0	202	0	GU0531	0	4	3	0
2059	2045	13403	17	14	0	3	S10	3	2,088	1,572	1,09641	0,82546	2	202	0,9	GU0546	1,5	38	31	0
2062	2059	13416	0	0	0	3	S10	2,13	1,48248	1,11612	0,77845	0,58607	2	202	0,9		1,5	38	31	0
2076	2062	13416	10	9	0	3	S10	0,74	0,51504	0,38776	0,27045	0,20361	3	202	1,4	GU0545	2,3	61	51	0
2080	2076	13416	0	0	0	3	S10	0,87	0,60552	0,45588	0,31796	0,23938	5	202	2,4		3,8	83	70	0
2093	2080	13416	18	15	0	3	S10	1,16	0,80736	0,60784	0,42394	0,31918	21	202	10,4		16,1	381	316	0
2105	2093	13458	0	0	0	3	S10	0,1	0,0696	0,0524	0,03655	0,02732	21	202	10,4	GU0548	16,1	381	316	0
3955	2105	13458	0	0	0	3	S10	0,04	0,02784	0,02096	0,01462	0,01101	23	202	11,3		17,6	420	348	0
24828	2119	14102	98	82	0	3	S10	0,22	0,15312	0,11528	0,08040	0,06053	106	202	52,4		81,5	2253	1878	600
2119	2122	14088	26	21	0	3	S10	0,14	0,09744	0,07336	0,05117	0,03852	98	202	48,5	GU0554	75,3	2103	1753	600
2122	2136	14088	31	26	0	3	S10	0,04	0,02784	0,02096	0,01462	0,01101	97	202	48		74,6	2077	1732	600
24801	2140	14088	34	28	0	3	A04	0,09	0,1377	0,0441	0,07231	0,02316	22	118	18,6		16,9	517	430	300
2140	2153	14075	28	23	0	3	A04	0,24	0,3672	0,1176	0,19282	0,06175	18	118	15,2		13,8	432	360	300
51055	2167	13937	20	16	300	3	S04	0,3	0,4794	0,1578	0,25173	0,08286	16	116	13,7		12,3	385	321	300
2625	2171	13799	2	2	0	3	S04	1,39	2,22122	0,73114	1,16636	0,38392	14	116	12		10,7	250	210	0
24768	2184	13771	45	37	0	3	A04	0,47	0,7191	0,2303	0,37760	0,12093	13	118	11	GU0558	10	238	199	0
6002	2198	13743	21	17	0	3	S04	0,28	0,44744	0,14728	0,23495	0,07734	9	116	7,7		6,9	166	140	0
2198	2200	13688	12	10	0	3	S04	2,83	4,52234	1,48858	2,37468	0,78165	8	116	6,9		6,1	145	123	0
1681	2213	13647	0	0	0	3	S04	0,1	0,1598	0,0526	0,08391	0,02762	5	116	4,3		3,8	93	79	0
2213	2227	13633	18	15	0	1	S04	0,96	1,53408	0,50496	0,80555	0,26515	3	116	2,5	GU0585	2,3	18	15	0
2213	2231	13605	13	11	0	1	S04	1,22	1,94956	0,64172	1,02371	0,33697	5	116	4,3	GU0561	3,8	32	27	0
51038	2244	13578	14	12	0	1	S04	0,94	1,50212	0,49444	0,78876	0,25963	7	116	6		5,3	42	36	0
2352	2258	13909	1	1	0	1	S04	0,6	0,9588	0,3156	0,50347	0,16572	0	116	0	GU0597	0	1	1	0
2167	2261	13799	25	21	0	1	S04	2,68	4,28264	1,40968	2,24881	0,74022	10	116	8,6	GU0535	7,6	61	51	0
2261	2275	13716	36	30	0	1	S04	2,62	4,18676	1,37812	2,19847	0,72365	6	116	5,1	GU0536	4,6	36	30	0
2136	2289	14088	17	14	0	3	A10	0,06	0,0363	0,02712	0,01906	0,01424	70	214	32,7		53,8	1449	1210	300
2289	2292	14088	95	79	0	3	A02	0,11	0,10582	0,05148	0,05557	0,02703	13	158	8,2	GU0555	10	246	205	0
2289	2304	14075	44	37	0	3	A10	0,12	0,0726	0,05424	0,03812	0,02848	56	214	26,1		43	1186	991	300
2304	2318	14075	43	36	0	3	A10	0,03	0,01815	0,01356	0,00953	0,00712	7	214	3,2	GU0556	5,3	132	110	0
1707	2321	13964	10	9	0	3	S10	0,59	0,41064	0,30916	0,21563	0,16234	51	202	25,2	GU0557	39,2	955	798	0
2321	2335	13826	15	13	0	3	S10	2,42	1,68432	1,26808	0,88444	0,66587	39	202	19,3	GU0533	30	725	604	0
2321	2349	13950	0	0	0	3	S04	0,4	0,6392	0,2104	0,33564	0,11048	12	116	10,3		9,2	220	185	0
2349	2352	13909	24	20	0	3	S02	2,16	2,268	1,14264	1,19093	0,60000	10	154	6,4	GU0587	7,6	177	149	0
2352	2366	13868	11	9	0	3	S02	2,52	2,646	1,33308	1,38941	0,70000	8	154	5,1		6,1	152	128	0
2366	2370	13840	24	20	0	3	S02	1,59	1,6695	0,84111	0,87665	0,44167	7	154	4,5	GU0588	5,3	135	114	0
2764	2383	13785	19	16	0	3	S02	1,07	1,1235	0,56603	0,58995	0,29722	5	154	3,2		3,8	96	81	0
2383	2397	13757	40	33	0	3	S02	3,86	4,053	2,04194	2,12823	1,07222	4	154	2,6	GU0589	3	77	65	0
2397	2409	13743	14	12	0	3	S02	1,76	1,848	0,93104	0,97038	0,48889	2	154	1,3	GU0590	1,5	37	32	0
1755	2412	13743	8	7	0	3	S02	2,08	2,184	1,10032	1,14682	0,57778	0	154	0		0	8	7	0
2062	2426	13416	5	4	0	3	S04	0,58	0,92684	0,30508	0,48668	0,16020	1	116	0,8	GU0551	0,7	13	11	0
2076	2430	13416	22	19	0	3	S04	1,98	3,16404	1,04148	1,66144	0,54688	1	116	0,8	GU0547	0,7	22	19	0
50734	2443	13334	23	19	0	3	S04	1,39	2,22122	0,73114	1,16636	0,38392	15	116	12,9		11,5	269	222	0
2443	2457	13278	6	5	0	3	S04	1,47	2,34906	0,77322	1,23349	0,40602	14	116	12		10,7	246	203	0
2457	2461	13237	43	36	0	3	S04	1,16	1,85368	0,61016	0,97337	0,32039	14	116	12	GU0534	10,7	240	198	0
2119	2474	14102	52	43	0	3	P50	0,06	0,04434	0,01824	0,02328	0,00958	3	217	1,3	GU0553	2,3	52	43	0
50751	2488	13154	42	35	0	3	S04	0,14	0,22372	0,07364	0,11748	0,03867	11	116	9,4		8,4	186	153	0
2488	2491	13058	44	36	0	1	S04	2,37	3,78726	1,24662	1,98869	0,65460	7	116	6	GU0593	5,3	44	36	0
1772	2503	13085	5	4	0	1	S04	0,51	0,81498	0,26826	0,42795	0,14086	9	116	7,7		6,9	54	45	0
2503	2517	12961	49	41	0	1	S04	2,71	4,33058	1,42546	2,27399	0,74851	8	116	6,9	GU0594	6,1	49	41	0
2335	2																			



2231	2534	13592	2	2	0	1	S04	1,16	1,85368	0,61016	0,97337	0,32039	2	116	1,7	GU0596	1,5	14	12	0
3941	2548	13375	22	19	0	1	S04	1,28	2,04544	0,67328	1,07406	0,35354	13	116	11,2	GU0595	10	78	67	0
2031	2551	13403	0	0	0	3	S04	1,18	1,88564	0,62068	0,99015	0,32592	0	116	0	GU0537	0	0	0	0
2167	2565	13909	15	12	0	3	S04	0,64	1,02272	0,33664	0,53703	0,17677	16	116	13,7		12,3	304	254	0
2366	2579	13854	6	5	0	1	S04	1,84	2,94032	0,96784	1,54396	0,50821	1	116	0,8	GU0598	0,7	6	5	0
2548	2582	13265	13	11	0	1	S04	2,62	4,18676	1,37812	2,19847	0,72365	8	116	6,9	GU0580	6,1	46	39	0
2582	2596	13237	0	0	0	1	S04	0,84	1,34232	0,44184	0,70485	0,23201	5	116	4,3		3,8	28	24	0
2596	2608	13209	19	16	0	1	S04	1,94	3,10012	1,02044	1,62787	0,53583	3	116	2,5	GU0581	2,3	19	16	0
2596	2611	13223	2	2	0	1	S04	0,9	1,4382	0,4734	0,75520	0,24858	2	116	1,7	GU0582	1,5	9	8	0
2545	2625	13854	12	10	0	3	S04	1,44	2,30112	0,75744	1,20832	0,39773	14	116	12		10,7	267	224	0
2545	2639	13909	16	13	0	1	S04	0,31	0,49538	0,16306	0,26012	0,08562	4	116	3,4	GU0564	3	22	18	0
2639	2642	13909	6	5	0	1	S04	0,79	1,26242	0,41554	0,66290	0,21820	1	116	0,8	GU0565	0,7	6	5	0
2200	2656	13688	8	7	0	1	S04	0,69	1,10262	0,36294	0,57899	0,19058	1	116	0,8	GU0566	0,7	8	7	0
2534	2660	13592	12	10	0	1	S04	0,59	0,94282	0,31034	0,49507	0,16296	2	116	1,7	GU0599	1,5	12	10	0
1790	2673	13509	10	9	0	1	A04	1,23	1,8819	0,6027	0,98819	0,31648	2	118	1,6	GU0603	1,5	13	12	0
2304	2687	14075	24	20	0	3	A10	0,1	0,0605	0,0452	0,03177	0,02373	47	214	21,9		36,1	1010	844	300
2521	2691	13674	8	7	0	3	S10	1,5	1,044	0,786	0,54820	0,41273	37	202	18,3		28,4	681	567	0
3742	2702	13633	37	31	0	1	S04	0,6	0,9588	0,3156	0,50347	0,16572	7	116	6	GU0529	5,3	42	36	0
2691	2716	13633	0	0	0	3	S10	0,73	0,50808	0,38252	0,26679	0,20086	33	202	16,3		25,3	597	496	0
51069	2720	13523	35	29	0	3	S10	0,84	0,58464	0,44016	0,30699	0,23113	33	202	16,3		25,3	597	496	0
2720	2733	13412	24	20	0	3	S10	2,29	1,59384	1,19996	0,83693	0,63010	31	202	15,3		23,8	555	461	0
2105	2747	13444	21	17	0	1	S04	0,25	0,3995	0,1315	0,20978	0,06905	6	116	5,1	GU0563	4,6	39	32	0
2318	2751	14075	89	74	0	3	A04	0,08	0,1224	0,0392	0,06427	0,02058	5	118	4,2		3,8	89	74	0
2370	2764	13799	15	13	0	3	S02	3,06	3,213	1,61874	1,68715	0,85000	6	154	3,9		4,6	111	94	0
2461	2778	13223	0	0	0	3	S04	0,48	0,76704	0,25248	0,40277	0,13258	11	116	9,4		8,4	190	156	0
2292	2781	14088	59	49	0	3	A02	0,37	0,35594	0,17316	0,18690	0,09093	8	158	5		6,1	151	126	0
2781	2795	14088	92	77	0	3	A02	0,46	0,44252	0,21528	0,23237	0,11304	5	158	3,1	GU0579	3,8	92	77	0
2733	2807	13385	4	3	0	3	S10	0,57	0,39672	0,29868	0,20832	0,15684	30	202	14,8	GU0540	23	531	441	0
24741	2811	13343	27	22	0	3	S04	0,26	0,41548	0,13676	0,21817	0,07181	29	116	25		22,3	524	436	0
2811	2824	13343	17	14	0	3	S04	1,05	1,6779	0,5923	0,88106	0,29001	2	116	1,7	GU0571	1,5	27	23	0
2824	2838	13343	10	9	0	1	S04	0,72	1,15056	0,37872	0,60416	0,19887	2	116	1,7	GU0572	1,5	10	9	0
2811	2841	13136	24	20	0	3	S04	2,87	4,58626	1,50962	2,40824	0,79270	26	116	22,4		20	470	391	0
2841	2855	13012	30	25	0	3	S04	1,77	2,82846	0,93102	1,48522	0,48888	25	116	21,5		19,2	446	371	0
2855	2869	12984	24	20	0	3	S04	1,08	1,72584	0,56808	0,90624	0,29830	7	116	6	GU0573	5,3	127	106	0
2869	2872	12971	27	22	0	3	S04	1,76	2,81248	0,92576	1,47683	0,48612	2	116	1,7		1,5	27	22	0
2869	2886	12902	25	21	0	1	S04	1,13	1,80574	0,59438	0,94819	0,31211	13	116	11,2	GU0574	10	76	64	0
2886	2890	12888	5	4	0	1	S04	1,9	3,0362	0,9994	1,59431	0,52478	1	116	0,8	GU0622	0,7	8	7	0
2886	2901	12819	17	14	0	1	S04	2,03	3,24394	1,06778	1,70339	0,56069	8	116	6,9		6,1	43	36	0
2901	2915	12777	26	22	0	1	S04	1,89	3,02022	0,99414	1,58592	0,52202	5	116	4,3		3,8	26	22	0
2855	2929	12971	59	49	0	3	S04	0,85	1,3583	0,4471	0,71324	0,23477	17	116	14,6	GU0570	13	289	240	0
2929	2932	12929	0	0	0	3	S04	1,24	1,98152	0,65224	1,04050	0,34249	13	116	11,2	GU0628	10	230	191	0
2932	2946	12819	17	14	0	3	S04	3,08	4,92184	1,62008	2,58446	0,85070	13	116	11,2		10	230	191	0
2946	2950	12777	36	30	0	3	S04	1,39	2,22122	0,73114	1,16636	0,38392	10	116	8,6		7,6	174	145	0
2946	2963	12695	39	32	0	1	S04	3,34	5,33732	1,75684	2,80263	0,92252	7	116	6	GU0575	5,3	39	32	0
2950	2977	12736	21	17	0	3	S02	2,35	2,4675	1,24315	1,29568	0,65278	8	154	5,1	GU0576	6,1	138	115	0
2977	2981	12722	2	2	0	3	S02	1,3	1,365	0,6877	0,71676	0,36111	7	154	4,5		5,3	113	95	0
2981	2994	12695	40	33	0	3	S02	1,9	1,995	1,0051	1,04757	0,52778	6	154	3,9	GU0569	4,6	103	86	0
2994	3006	12681	21	18	0	1	S04	0,84	1,34232	0,44184	0,70485	0,23201	4	116	3,4	GU0577	3	21	18	0
2673	3253	13495	3	3	0	1	S04	2,98	4,76204	1,56748	2,50055	0,82308	1	116	0,8	GU0618	0,7	3	3	0
2977	3557	12736	4	3	0	1	S04	0,63	1,00674	0,33138	0,52864	0,17401	1	116	0,8	GU0605	0,7	4	3	0
2611	3574	13223	7	6	0	1	S04	0,79	1,26242	0,41554	0,66290	0,21820	1	116	0,8	GU0503	0,7	7	6	0
2551	3588	13403	0	0	0	3	S04	0,4	0,6392	0,2104	0,33564	0,11048	0	116	0	GU0617	0	0	0	0
2625	3621	13854	5	4	0	1	S04	0,93	1,48614	0,48918	0,78037	0,25687	1	116	0,8	GU0611	0,7	5	4	0
2171	3634	13799	5	5	0	1	S04	0,36	0,57528	0,18936	0,30208	0,09943	1	116	0,8	GU0610	0,7	5	5	0
2184	3648	13771	11	9	0	3	A02	0,3	0,2886	0,1404	0,15154	0,07372	1	158	0,6	GU0609	0,7	11	9	0
50734	3651	13389	11	9	0	3	S04	0,05	0,0799	0,0263	0,04196	0,01381	1	116	0,8	GU0607	0,7	11	9	0
2720	3665	13523	7	6	0	1	S04	0,78	1,24644	0,41028	0,65451	0,21544	1	116	0,8	GU0608	0,7	7	6	0
24741	3679	13357	3	2	0	1	S04	0,6	0,9588	0,3156	0,50347	0,16572	0	116	0	GU0606	0	3	2	0
24828	3682	14130	22	18	0	3	A04	0,46	0,7038	0,2254	0,36957	0,11836	1	118	0,8	GU0511	0,7	22	18	0
24801	3696	14088	38	31	0	3	A04	0,17	0,2601	0,0833	0,13658	0,04374	2	118	1,6	GU0512	1,5	38	31	0
2994	3708	12695	0	0	0	3	S02	1,2	1,26	0,6348	0,66163	0,33333	2	154	1,3		1,5	42	35	0
5939	3711	12653	17	14	0	1	S04	1,74	2,78052	0,91524	1,46005	0,48059	3	116	2,5		2,3	17	14	0
2045	3725	13403	0	0	0	3	S10	0,2	0,1392	0,1048	0,07309	0,05503	0	202	0		0	4	3	0
3791	3739	14185	87	72	0	3	S10	0,07	0,04872	0,03668	0,02558	0,01926	115	202	56,9		88,4	2437	2031	600
2691	3742	13661	34	28	0	3	S04	0,89	1,42222	0,46814	0,74681	0,24582	4	116	3,4	GU0538	3	76	64	0
2140	3756	14088	51	42	0	3	A04	0,05	0,0765	0,0245	0,04017	0,01286	3	118	2,5	GU0543	2,3	51	42	0
3739	3760	14185	75	63	0	3	A04	0,3	0,459	0,147	0,24102	0,07719	4	118	3,3	GU0544	3	75	63	0
2231	3773	13605	5	4	0	1	S04	1,11	1,77378	0,58386	0,93141	0,30658	1	116	0,8	GU0510	0,7	5	4	0
2747	3787	13444	18	15	0	1	A02	0,2	0,1924	0,0936										

0	3847	14300	0	0	0	0	533	1	0,19	0,396	0,09977	0,20794	130	9999	1,3	100	2956	2463	1200	
3833	3851	14300	3	2	0	3	533	0,01	0,0019	0,00396	0,00100	0,00208	130	453	28,7	100	2956	2463	1200	
3833	3864	14300	0	0	0	3	510	0,03	0,02088	0,01572	0,01096	0,00825	0	202	0	GU0500	0	0	0	
51726	3878	14258	0	0	0	3	533	0,56	0,1064	0,22176	0,05587	0,11645	130	453	28,7	100	2953	2461	1200	
3878	3881	14231	0	0	0	3	533	0,42	0,0798	0,16632	0,04190	0,08733	130	453	28,7	100	2953	2461	1200	
3881	3895	14065	0	0	0	3	533	2,15	0,4085	0,8514	0,21450	0,44707	130	453	28,7	GU0517	100	2953	2461	
3895	3907	13913	0	0	0	3	533	2,09	0,3971	0,82764	0,20852	0,43459	132	453	29,1	101,5	2953	2461	1200	
3907	3911	13817	0	0	0	3	533	1,28	0,2432	0,50688	0,12770	0,26616	133	453	29,3	GU0518	102,3	2953	2461	1200
3911	3924	13734	0	0	0	3	533	1,05	0,1995	0,4158	0,10476	0,21834	134	453	29,5	GU0519	103	2953	2461	1200
3924	3938	13582	6	5	0	3	533	1,93	0,3667	0,76428	0,19255	0,40132	135	453	29,8	GU0520	103,8	2953	2461	1200
3938	3941	13472	0	0	0	3	533	1,39	0,2641	0,55044	0,13868	0,28904	136	453	30	GU0521	104,6	2947	2456	1200
3941	3955	13458	12	10	0	3	533	0,14	0,0266	0,05544	0,01397	0,02911	133	453	29,3	102,3	2869	2389	1200	
2045	3969	13403	4	3	0	3	504	0,36	0,57528	0,18936	0,30208	0,09943	1	116	0,8	GU0504	0,7	17	14	0
2461	3972	13237	7	6	0	1	504	0,86	1,37428	0,45236	0,72163	0,23753	1	116	0,8	GU0505	0,7	7	6	0
50751	3986	13154	4	3	0	1	504	0,26	0,41548	0,13676	0,21817	0,07181	1	116	0,8	GU0506	0,7	4	3	0
2582	3990	13265	5	4	0	1	504	1,08	1,72584	0,56808	0,90624	0,29830	1	116	0,8	GU0509	0,7	5	4	0
50765	4001	13361	5	4	0	1	504	1,15	1,8377	0,6049	0,96498	0,31763	1	116	0,8	GU0508	0,7	5	4	0
2981	5925	12708	8	7	0	1	504	2,12	3,38776	1,11512	1,77891	0,58555	1	116	0,8	GU0613	0,7	8	7	0
3708	5939	12681	12	10	0	1	504	0,54	0,86292	0,28404	0,45312	0,14915	5	116	4,3	GU0578	3,8	29	24	0
24814	5956	14088	42	35	0	3	A04	0,16	0,2448	0,0784	0,12854	0,04117	2	118	1,6	GU0601	1,5	42	35	0
3708	5960	12667	13	11	0	1	504	1,77	2,82846	0,93102	1,48522	0,48888	2	116	1,7	GU0616	1,5	13	11	0
2349	5973	13950	43	36	0	3	504	0,13	0,20774	0,06838	0,10908	0,03591	2	116	1,7	GU0615	1,5	43	36	0
1724	5987	14033	3	3	0	1	504	0,43	0,68714	0,22618	0,36082	0,11877	1	116	0,8	GU0526	0,7	3	3	0
24799	5991	13964	11	9	0	3	504	0,53	0,84694	0,27878	0,44473	0,14639	1	116	0,8	GU0514	0,7	11	9	0
2184	6002	13757	0	0	0	3	A04	0,59	0,9027	0,2891	0,47401	0,15181	10	118	8,4	GU0559	7,6	182	153	0
2702	20830	13633	5	5	0	1	504	1,4	2,2372	0,7364	1,17475	0,38668	1	116	0,8	GU0614	0,7	5	5	0
2807	24741	13357	0	0	0	3	504	0,32	0,51136	0,16832	0,26852	0,08838	30	116	25,8	23	527	438	0	
3773	24754	13605	0	0	0	1	504	2,5	3,995	1,315	2,09777	0,69051	0	116	0	0	0	0	0	
2171	24768	13785	5	4	0	3	504	0,41	0,65518	0,21566	0,34403	0,11324	13	116	11,2	10	243	203	0	
2153	24799	13964	1	1	0	3	504	2,38	3,80324	1,25188	1,99708	0,65736	17	116	14,6	GU0549	13	404	337	300
24814	24801	14088	0	0	0	3	A04	0,06	0,0918	0,0294	0,04820	0,01544	24	118	20,3	GU0562	18,4	555	461	300
2136	24814	14088	0	0	0	3	A04	0,06	0,0918	0,0294	0,04820	0,01544	26	118	22	20	597	496	300	
3739	24828	14130	0	0	0	3	510	0,39	0,27144	0,20436	0,14253	0,10731	107	202	52,9	GU0582	82,3	2275	1896	600
3847	50077	14300	0	0	0	3	533	0,01	0,0019	0,00396	0,00100	0,00208	130	453	28,7	GU0283	100	2956	2463	1200
2200	50280	13661	4	3	0	3	504	1,25	1,9975	0,6575	1,04889	0,34525	7	116	6	GU0567	5,3	125	106	0
50280	50293	13661	1	1	0	1	504	0,09	0,14382	0,04734	0,07552	0,02486	0	116	0	GU0584	0	1	1	0
3969	50340	13403	13	11	0	1	504	0,35	0,5593	0,1841	0,29369	0,09667	2	116	1,7	GU0619	1,5	13	11	0
2335	50353	13826	12	10	0	1	504	0,16	0,25568	0,08416	0,13426	0,04419	2	116	1,7	GU0620	1,5	12	10	0
2521	50367	13757	5	4	0	1	504	1,04	1,66192	0,54704	0,87267	0,28725	1	116	0,8	GU0621	0,7	5	4	0
2890	50371	12888	3	3	0	1	504	0,79	1,26242	0,41554	0,66290	0,21820	1	116	0,8	0,7	3	3	0	
2080	50734	13389	0	0	0	3	504	0,65	1,0387	0,3419	0,54542	0,17953	16	116	13,7	GU0532	12,3	280	231	0
2778	50748	13182	0	0	0	3	504	1,61	2,57278	0,84686	1,35097	0,44469	11	116	9,4	GU0592	8,4	190	156	0
50748	50751	13154	0	0	0	3	504	0,73	1,16654	0,38398	0,61255	0,20163	11	116	9,4	8,4	190	156	0	
2548	50765	13361	5	5	0	1	504	1,85	2,9563	0,9731	1,55235	0,51097	2	116	1,7	1,5	10	9	0	
3955	50902	13458	0	0	600	3	A33	0,08	0,0152	0,03248	0,00798	0,01706	110	453	24,2	84,6	2437	2031	1200	
2213	51038	13619	0	0	0	1	504	0,65	1,0387	0,3419	0,54542	0,17953	7	116	6	GU0560	5,3	43	37	0
51038	51041	13619	1	1	0	1	504	0,44	0,70312	0,23144	0,36921	0,12153	0	116	0	GU0612	0	1	1	0
24799	51055	13950	7	6	0	3	504	0,3	0,4794	0,1578	0,25173	0,08286	16	116	13,7	12,3	392	327	300	
2716	51069	13564	0	0	0	3	510	1,27	0,88392	0,66548	0,46415	0,34944	33	202	16,3	GU0539	25,3	597	496	0
1738	51072	14047	0	0	0	3	A10	0,1	0,0605	0,0452	0,03177	0,02373	52	214	24,3	40	977	817	0	
2426	51146	13416	8	7	0	1	504	0,79	1,26242	0,41554	0,66290	0,21820	1	116	0,8	GU0528	0,7	8	7	0
51726	51712	14300	0	0	0	3	504	0,36	0,57528	0,18936	0,30208	0,09943	0	116	0	GU0623	0	0	0	0
3851	51726	14300	0	0	0	3	533	0,05	0,0095	0,0198	0,00499	0,01040	130	453	28,7	GU0516	100	2953	2461	1200

Dados do arquivo sistema.ATP, resultante da modelagem do sistema no ATPDraw.

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW março, domingo 18, 2007
C A Bonneville Power Administration program
C Programmed by H. K. Høidalen at SEFAS - NORWAY 1994-2003
C -----
C dT << Tmax << Xopt << Copt >
  1.E-5 .1
  500 1 1 1 1 0 0 1 0
C 1 2 3 4 5 6 7 8
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C <n 1><n 2><ref1><ref2><R <<L <<C >
C <n 1><n 2><ref1><ref2><R <<A <<B ><Leng><><>0
3253 10118.26838. 3
2673 3360.88023.4 3
1790 7433.815775. 3
1815 6032.213334. 3
1801 9812.419521. 3
2244 2530.55753.4 3
3773 7524.215967. 3
2231 2765.86207.8 3
51041 30913.81999. 3
2227 2031.2 4490. 3
2660 3028.66694.6 3
2534 15395.40837. 3
C Linha 51038-2244
51038 2244 1.50211.3115 0
C Linha 2213-51038
2213B 51038 1.0387.90692 0
C Linha 2244-1801
2244 1801 .70312.61391 0
C Linha 1801-1815
1801 1815 1.40621.2278 0
C Linha 1801-1790
1801 1790 3.81923.3347 0
C Linha 2673-3253
2673 3253 4.7624.1579 0
C Linha 1790-2673
1790 2673 1.88191.5987 0
C Linha 2244-3802
2244 3802 1.1026.96273 0
C Linha 51038-51041
51038 51041 .70312.61391 0
C Linha 2213-2227
2213A 2227 1.53411.3394 0
C Linha 2213-2231
2213C 2231 1.94961.7022 0
C Linha 2231-2534
2231 2534 1.85371.6185 0
C Linha 2534-2660
2534 2660 .94282 .8232 0
C Linha 2231-3773
2231 3773 1.77381.5487 0
C Linha 3773-24754
3773 24754 3.9953.4881 0
C Linha 2184-3648
2184A 3648A .2886.37242 0
2184B 3648B .2886.37242 0
2184C 3648C .2886.37242 0
C Linha 2184-6002
2184A 6002A .9027.76687 0
2184B 6002B .9027.76687 0
2184C 6002C .9027.76687 0
C Linha 6002-1678
6002A 1678A .27166 .2372 0
6002B 1678B .27166 .2372 0
6002C 1678C .27166 .2372 0

```

C Linha 50280-1681		
50280A1681A	1.66191.4511	0
50280B1681B	1.66191.4511	0
50280C1681C	1.66191.4511	0
C Linha 1681-1695		
1681A 1695	.306.25995	0
C Linha 6002-2198		
6002A 2198A	4.52233.9486	1
6002B 2198B	4.52233.9486	1
6002C 2198C	4.52233.9486	1
C Linha 1681-2213		
1681A 2213A	.1598.13953	1
1681B 2213B	.1598.13953	1
1681C 2213C	.1598.13953	1
C Linha 2198-2200		
2198A 2200A	4.52233.9486	0
2198B 2200B	4.52233.9486	0
2198C 2200C	4.52233.9486	0
C Linha 2200-2656		
2200A 2656	1.1026.96273	0
C Linha 2200-50280		
2200A 50280A	1.99751.7441	0
2200B 50280B	1.99751.7441	0
2200C 50280C	1.99751.7441	0
C Linha 50280-50293		
50280A50293	.14382.12557	0
1681A	6106.213498.	3
1681B	6106.213498.	3
1681C	6106.213498.	3
1695	3853.39085.4	3
50280A	29590.59104.	3
50280B	29590.59104.	3
50280C	29590.59104.	3
50293	31104.82505.	3
2200A	9214.520369.	3
2200B	9214.520369.	3
2200C	9214.520369.	3
2656	4421.510262.	3
2198A	5433.211667.	3
2198B	5433.211667.	3
2198C	5433.211667.	3
1678A	7124.915356.	3
1678B	7124.915356.	3
1678C	7124.915356.	3
3648A	10327.22413.	3
3648B	10327.22413.	3
3648C	10327.22413.	3
2184A	2514.45483.9	3
2184B	2514.45483.9	3
2184C	2514.45483.9	3
C Linha 51055-2167		
51055A2167A	.4794.41858	1
51055B2167B	.4794.41858	1
51055C2167C	.4794.41858	1
C Linha 2625-2171		
2625A 2171A	2.22121.9394	0
2625B 2171B	2.22121.9394	0
2625C 2171C	2.22121.9394	0
C Linha 2565-2625		
2565A 2625A	2.30112.0092	0
2565B 2625B	2.30112.0092	0
2565C 2625C	2.30112.0092	0
C Linha 2167-2565		
2167A 2565A	1.0227.89297	1
2167B 2565B	1.0227.89297	1
2167C 2565C	1.0227.89297	1
C Linha 2565-2639		
2565C 2639	.49538.43253	0
C Linha 2639-2642		
2639 2642	1.26241.1023	0
C Linha 2625-3621		
2625B 3621	1.48611.2976	0
C Linha 2171-3634		
2171A 3634	.57528.50229	0

C Linha 24768-2184		
24768A2184A	.7191.61089	0
24768B2184B	.7191.61089	0
24768C2184C	.7191.61089	0
C Linha 2171-24768		
2171A 24768A	.65518.57206	0
2171B 24768B	.65518.57206	0
2171C 24768C	.65518.57206	0
C Linha 2167-2261		
2167B 2261	4.28263.7393	0
C Linha 2261-2275		
2261 2275	4.18683.6556	0
24768A	23174.49177.	3
24768B	23174.49177.	3
24768C	23174.49177.	3
3634	6347.116836.	3
2171A	47603.1.26E5	3
2171B	47603.1.26E5	3
2171C	47603.1.26E5	3
3621	7802.216557.	3
2642	6343.14021.	3
2639	2427.75232.3	3
2625A	9439.320866.	3
2625B	9439.320866.	3
2625C	9439.320866.	3
2565A	7864.216688.	3
2565B	7864.216688.	3
2565C	7864.216688.	3
2275	1028.2272.4	3
2261	1488.53316.7	3
2167A	5922.12567.	3
2167B	5922.12567.	3
2167C	5922.12567.	3
C Linha 24801-3696		
24801A3696A	.2601.22096	0
24801B3696B	.2601.22096	0
24801C3696C	.2601.22096	0
C Linha 2140-2153		
2140A 21531A	.3672.31194	1
2140B 21531B	.3672.31194	1
2140C 21531C	.3672.31194	1
C Linha 24814-5956		
24814A5956A	.2448.20796	0
24814B5956B	.2448.20796	0
24814C5956C	.2448.20796	0
C Linha 24801-2140		
24811A2140A	.1377.11698	1
24811B2140B	.1377.11698	1
24811C2140C	.1377.11698	1
C Linha 2140-3756		
2140A 3756A	.0765.06499	0
2140B 3756B	.0765.06499	0
2140C 3756C	.0765.06499	0
C Linha 24799-5991		
24799A5991A	.84694.73949	0
24799B5991B	.84694.73949	0
24799C5991C	.84694.73949	0
C Linha 2153-24799		
2153A 24799A	3.80323.3207	1
2153B 24799B	3.80323.3207	1
2153C 24799C	3.80323.3207	1
C Linha 24814-24801		
24814A24801A	.0918.07799	0
24814B24801B	.0918.07799	0
24814C24801C	.0918.07799	0
C Linha 2136-24814		
2136A 24814A	.0918.07799	1
2136B 24814B	.0918.07799	1
2136C 24814C	.0918.07799	1
C Linha 24799-51055		
24799A51055A	.4794.41858	1
24799B51055B	.4794.41858	1
24799C51055C	.4794.41858	1
51055A	16026.36438.	3

51055B	16026.36438.	3
51055C	16026.36438.	3
24799A	97497.2.59E5	3
24799B	97497.2.59E5	3
24799C	97497.2.59E5	3
5991A	10618.23045.	3
5991B	10618.23045.	3
5991C	10618.23045.	3
2153A	4224.69205.1	3
2153B	4224.69205.1	3
2153C	4224.69205.1	3
3756A	2318.95065.6	3
3756B	2318.95065.6	3
3756C	2318.95065.6	3
2140A	3478.47598.4	3
2140B	3478.47598.4	3
2140C	3478.47598.4	3
3696A	3135.9 6786.	3
3696B	3135.9 6786.	3
3696C	3135.9 6786.	3
5956A	2788.86164.7	3
5956B	2788.86164.7	3
5956C	2788.86164.7	3
2136A	3758.58361.7	3
2136B	3758.58361.7	3
2136C	3758.58361.7	3
C Linha 2977-2981		
2977A 2981A	1.3651.8242	0
2977B 2981B	1.3651.8242	0
2977C 2981C	1.3651.8242	0
C Linha 2994-3006		
2994B 3006	1.3423 1.172	0
C Linha 2977-3557		
2977C 3557	1.0067.87901	0
C Linha 2994-3708		
2994A 3708A	1.261.6839	0
2994B 3708B	1.261.6839	0
2994C 3708C	1.261.6839	0
C Linha 2981-2994		
2981A 2994A	1.9952.6661	0
2981B 2994B	1.9952.6661	0
2981C 2994C	1.9952.6661	0
C Linha 2981-5925		
2981A 5925	3.38782.9579	0
C Linha 3708-5939		
3708A 5939	.86292.75344	0
C Linha 5939-3711		
5939 3711	2.78052.4277	0
C Linha 3708-5960		
3708C 5960	2.82852.4696	0
3711	1870.64086.2	3
5939	2636.25827.3	3
5960	2397.65381.3	3
2994A	2397.45246.4	3
2994B	2397.45246.4	3
2994C	2397.45246.4	3
3006	1471.43345.5	3
5925	3811.18845.5	3
2981A	40462.1.07E5	3
2981B	40462.1.07E5	3
2981C	40462.1.07E5	3
3557	8651.17211.	3
2977A	4666.210020.	3
2977B	4666.210020.	3
2977C	4666.210020.	3
C Linha 2929-2932		
2929A 2932A	1.98151.7301	1
2929B 2932B	1.98151.7301	1
2929C 2932C	1.98151.7301	1
C Linha 2855-2929		
2855A 2929A	1.3583 1.186	1
2855B 2929B	1.3583 1.186	1
2855C 2929C	1.3583 1.186	1
C Linha 2932-2946		

2932A 2946A	4.92184.2974	0
2932B 2946B	4.92184.2974	0
2932C 2946C	4.92184.2974	0
C Linha 2946-2950		
2946A 2950A	2.22121.9394	0
2946B 2950B	2.22121.9394	0
2946C 2950C	2.22121.9394	0
C Linha 2946-2963		
2946A 2963	5.33734.6602	0
C Linha 2950-2977		
2950A 2977A	2.46753.2976	1
2950B 2977B	2.46753.2976	1
2950C 2977C	2.46753.2976	1
2963	823.231791.7	3
2950A	2676.35915.8	3
2950B	2676.35915.8	3
2950C	2676.35915.8	3
2946A	5759.912582.	3
2946B	5759.912582.	3
2946C	5759.912582.	3
2929A	1687.63717.8	3
2929B	1687.63717.8	3
2929C	1687.63717.8	3
C Linha 2855-2869		
2855A 2869A	1.72581.5069	1
2855B 2869B	1.72581.5069	1
2855C 2869C	1.72581.5069	1
C Linha 2869-2872		
2869A 2872A	2.81252.4557	0
2869B 2872B	2.81252.4557	0
2869C 2872C	2.81252.4557	0
C Linha 2869-2886		
2869B 2886	1.80571.5766	0
C Linha 2886-2890		
2886 2890	3.0362 2.651	0
C Linha 2886-2901		
2886 2901	3.24392.8324	0
C Linha 2901-2915		
2901 2915	3.0202 2.637	0
C Linha 2890-50371		
2890 50371	1.26241.1023	0
50371	9227.824478.	3
2890	6752.114328.	3
2915	1219.727376.	3
2901	1920.4194.1	3
2886	1301.32899.5	3
2872A	3745.8094.4	3
2872B	3745.8094.4	3
2872C	3745.8094.4	3
2869A	4145.59163.6	3
2869B	4145.59163.6	3
2869C	4145.59163.6	3
C Linha 2811-2841		
2811A 2841A	4.58634.0044	0
2811B 2841B	4.58634.0044	0
2811C 2841C	4.58634.0044	0
C Linha 2841-2855		
2841A 2855A	2.82852.4696	1
2841B 2855B	2.82852.4696	1
2841C 2855C	2.82852.4696	1
2855A	3330.77362.5	3
2855B	3330.77362.5	3
2855C	3330.77362.5	3
2841A	4243.19379.4	3
2841B	4243.19379.4	3
2841C	4243.19379.4	3
C Linha 2720-2733		
2720A 2733A	1.5938 3.183	0
2720B 2733B	1.5938 3.183	0
2720C 2733C	1.5938 3.183	0
C Linha 2733-2807		
2733A 2807A	.39672.79227	0
2733B 2807B	.39672.79227	0
2733C 2807C	.39672.79227	0

C Linha 24741-2811		
24741A2811A	.41548.36277	1
24741B2811B	.41548.36277	1
24741C2811C	.41548.36277	1
C Linha 2811-2824		
2811A 2824A	1.6779 1.465	0
2811B 2824B	1.6779 1.465	0
2811C 2824C	1.6779 1.465	0
C Linha 2824-2838		
2824A 2838	1.15061.0046	0
C Linha 2720-3665		
2720A 3665	1.24641.0883	0
C Linha 51069-2720		
51069A2720A	.584641.1676	1
51069B2720B	.584641.1676	1
51069C2720C	.584641.1676	1
C Linha 24741-3679		
24741A3679	.9588.83715	0
C Linha 2807-24741		
2807A 24741A	.51136.44648	0
2807B 24741B	.51136.44648	0
2807C 24741C	.51136.44648	0
2838	3278.77827.4	3
2811A	3962.98565.2	3
2811B	3962.98565.2	3
2811C	3962.98565.2	3
3679	13724.24269.	3
2807A	28666.57028.	3
2807B	28666.57028.	3
2807C	28666.57028.	3
2733A	4423.39777.7	3
2733B	4423.39777.7	3
2733C	4423.39777.7	3
2720A	3098. 6809.	3
2720B	3098. 6809.	3
2720C	3098. 6809.	3
3665	5020.11414.	3
C Linha 2716-51069		
2716A 51069A	.883921.7652	0
2716B 51069B	.883921.7652	0
2716C 51069C	.883921.7652	0
C Linha 2691-3742		
2691A 3742A	1.42221.2418	0
2691B 3742B	1.42221.2418	0
2691C 3742C	1.42221.2418	0
20830	6195.316434.	3
C Linha 3742-2702		
3742B 2702	.9588.83715	0
C Linha 2691-2716		
2691A 2716A	.508061.0147	0
2691B 2716B	.508061.0147	0
2691C 2716C	.508061.0147	0
C Linha 2702-20830		
2702 20830	2.23721.9534	0
2702	983.82186.4	3
C Linha 2321-2335		
2321A 2335A	1.68433.3637	0
2321B 2335B	1.68433.3637	0
2321C 2335C	1.68433.3637	0
C Linha 2335-2521		
2335A 2521A	.871.7374	0
2335B 2521B	.871.7374	0
2335C 2521C	.871.7374	0
2691A	13237.30724.	3
2691B	13237.30724.	3
2691C	13237.30724.	3
C Linha 2521-2691		
2521A 2691A	1.044 .786	0
2521B 2691B	1.044 .786	0
2521C 2691C	1.044 .786	0
C Linha 2335-50353		
2335A 50353	.25568.22324	0
C Linha 2521-50367		
2521B 50367	1.66191.4511	0



50367	7693.316326.	3
50353	3133.76927.1	3
2335A	7277.616731.	3
2335B	7277.616731.	3
2335C	7277.616731.	3
C Linha 2352-2258		
2352A 2258	.9588.83715	0
C Linha 2321-2349		
2321A 2349A	.6392 .5581	1
2321B 2349B	.6392 .5581	1
2321C 2349C	.6392 .5581	1
C Linha 2349-2352		
2349A 2352A	2.2683.0309	0
2349B 2352B	2.2683.0309	0
2349C 2352C	2.2683.0309	0
C Linha 2352-2366		
2352A 2366A	2.6463.5361	1
2352B 2366B	2.6463.5361	1
2352C 2366C	2.6463.5361	1
C Linha 2349-5973		
2349A 5973A	.20774.18138	0
2349B 5973B	.20774.18138	0
2349C 5973C	.20774.18138	0
2258	32243.85528.	3
2352A	4757.210516.	3
2352B	4757.210516.	3
2352C	4757.210516.	3
5973A	2660.75908.8	3
5973B	2660.75908.8	3
5973C	2660.75908.8	3
C Linha 2366-2370		
2366A 2370A	1.66952.2311	0
2366B 2370B	1.66952.2311	0
2366C 2370C	1.66952.2311	0
C Linha 2383-2397		
2383A 2397A	4.0535.4164	1
2383B 2397B	4.0535.4164	1
2383C 2397C	4.0535.4164	1
C Linha 2366-2579		
2366B 2579	2.94032.5673	0
C Linha 2370-2764		
2370A 2764A	3.2134.2938	0
2370B 2764B	3.2134.2938	0
2370C 2764C	3.2134.2938	0
C Linha 2764-2383		
2764A 2383A	1.12351.5014	0
2764B 2383B	1.12351.5014	0
2764C 2383C	1.12351.5014	0
2366A	10473.22729.	3
2366B	10473.22729.	3
2366C	10473.22729.	3
2370A	4710.110412.	3
2370B	4710.110412.	3
2370C	4710.110412.	3
2764A	7249.216666.	3
2764B	7249.216666.	3
2764C	7249.216666.	3
2383A	5851.713071.	3
2383B	5851.713071.	3
2383C	5851.713071.	3
2579	6292.913910.	3
C Linha 2409-1755		
2409A 1755A	.76651.0243	0
2409B 1755B	.76651.0243	0
2409C 1755C	.76651.0243	0
C Linha 1755-1769		
1755A 1769	1.0866.94878	0
C Linha 2397-2409		
2397A 2409A	1.8482.4697	0
2397B 2409B	1.8482.4697	0
2397C 2409C	1.8482.4697	0
C Linha 1755-2412		
1755A 2412A	2.1842.9187	0
1755B 2412B	2.1842.9187	0

1755C 2412C	2.1842.9187	0
2397A	2815.26160.8	3
2397B	2815.26160.8	3
2397C	2815.26160.8	3
2409A	7777.17682.	3
2409B	7777.17682.	3
2409C	7777.17682.	3
1755A	11723.27641.	3
1755B	11723.27641.	3
1755C	11723.27641.	3
2412A	13371.31035.	3
2412B	13371.31035.	3
2412C	13371.31035.	3
1769	6192.513688.	3
C Linha 1724-1707		
1724A 1707A	.2662.52755	0
1724B 1707B	.2662.52755	0
1724C 1707C	.2662.52755	0
C Linha 1707-1711		
1707A 1711A	.0612.05199	0
1707B 1711B	.0612.05199	0
1707C 1711C	.0612.05199	0
C Linha 1707-2321		
1707A 2321A	.41064.82007	1
1707B 2321B	.41064.82007	1
1707C 2321C	.41064.82007	1
2321A	10773.25719.	3
2321B	10773.25719.	3
2321C	10773.25719.	3
1711A	6040.813494.	3
1711B	6040.813494.	3
1711C	6040.813494.	3
C Linha 2687-1738		
2687A 1738A	.07865.15587	0
2687B 1738B	.07865.15587	0
2687C 1738C	.07865.15587	0
C Linha 1738-1741		
1738A 1741A	.19176.16743	0
1738B 1741B	.19176.16743	0
1738C 1741C	.19176.16743	0
2122A	.0001 2.7857	3
2122B	.0001 2.7857	3
2122C	.0001 2.7857	3
C Linha 2136-2289		
21361A22891A	.0363.07194	1
21361B22891B	.0363.07194	1
21361C22891C	.0363.07194	1
C Linha 2289-2292		
22891A2292A	.10582.13655	1
22891B2292B	.10582.13655	1
22891C2292C	.10582.13655	1
C Linha 2289-2304		
2289A 2304A	.0726.05424	0
2289B 2304B	.0726.05424	0
2289C 2304C	.0726.05424	0
C Linha 2304-2318		
2304A 2318A	.01815.03597	0
2304B 2318B	.01815.03597	0
2304C 2318C	.01815.03597	0
C Linha 2304-2687		
2304A 2687A	.0605 .1199	0
2304B 2687B	.0605 .1199	0
2304C 2687C	.0605 .1199	0
C Linha 2318-2751		
2318A 2751A	.1224.10398	0
2318B 2751B	.1224.10398	0
2318C 2751C	.1224.10398	0
C Linha 2292-2781		
2292A 2781A	.35594.45932	0
2292B 2781B	.35594.45932	0
2292C 2781C	.35594.45932	0
C Linha 2781-2795		
2781A 2795A	.44252.57105	0
2781B 2795B	.44252.57105	0

2781C 2795C	.44252.57105	0
C Linha 51072-1724		
51072A1724A	.121.23979	0
51072B1724B	.121.23979	0
51072C1724C	.121.23979	0
C Linha 1738-51072		
1738A 51072A	.57528.50229	0
1738B 51072B	.57528.50229	0
1738C 51072C	.57528.50229	0
C Linha 1724-5987		
1724A 5987	.68714.59996	0
5987	10940.29020.	3
1741A	13688.28239.	3
1741B	13688.28239.	3
1741C	13688.28239.	3
2751A	1316.12902.6	3
2751B	1316.12902.6	3
2751C	1316.12902.6	3
2318A	2708.66015.2	3
2318B	2708.66015.2	3
2318C	2708.66015.2	3
2687A	4871.410768.	3
2687B	4871.410768.	3
2687C	4871.410768.	3
2304A	2637.4 5883.	3
2304B	2637.4 5883.	3
2304C	2637.4 5883.	3
2289A	6956.715197.	3
2289B	6956.715197.	3
2289C	6956.715197.	3
2795A	1268.62816.5	3
2795B	1268.62816.5	3
2795C	1268.62816.5	3
2781A	1990.84385.7	3
2781B	1990.84385.7	3
2781C	1990.84385.7	3
2292A	1235.12724.4	3
2292B	1235.12724.4	3
2292C	1235.12724.4	3
C Linha 3955-50902		
39551A50902A	.0152.08616	1
39551B50902B	.0152.08616	1
39551C50902C	.0152.08616	1
C Linha 24828-2119		
24828A21191A	.15312.30579	0
24828B21191B	.15312.30579	0
24828C21191C	.15312.30579	0
C Linha 2119-2122		
2119A 2122A	.09744.19459	0
2119B 2122B	.09744.19459	0
2119C 2122C	.09744.19459	0
C Linha 2122-2136		
2122A 21361A	.02784 .0556	1
2122B 21361B	1. .001	1
2122C 21361C	1. .001	1
C Linha 2119-2474		
2119A 2474A	.04434.04838	0
2119B 2474B	.04434.04838	0
2119C 2474C	.04434.04838	0
C Linha 24828-3682		
24828A3682A	.7038.59789	0
24828B3682B	.7038.59789	0
24828C3682C	.7038.59789	0
C Linha 3791-3739		
3791A 3739A	.04872 .0973	0
3791B 3739B	.04872 .0973	0
3791C 3739C	.04872 .0973	0
C Linha 3739-3760		
3739A 3760A	.459.38993	0
3739B 3760B	.459.38993	0
3739C 3760C	.459.38993	0
C Linha 50902-3791		
50902A3791A	.0171.09693	0
50902B3791B	.0171.09693	0

50902C3791C	.0171.09693	0
C Linha 3739-24828		
3739A 24828A	.27144.54208	0
3739B 24828B	.27144.54208	0
3739C 24828C	.27144.54208	0
2122A	4619.89897.7	3
2122B	4619.89897.7	3
2122C	4619.89897.7	3
2474A	2271.3 4982.	3
2474B	2271.32271.3	3
2474C	2271.32271.3	3
2119A	1193.62649.2	3
2119B	1193.62649.2	3
2119C	1193.62649.2	3
3682A	5436.211798.	3
3682B	5436.211798.	3
3682C	5436.211798.	3
3760A	1573.3504.8	3
3760B	1573.3504.8	3
3760C	1573.3504.8	3
3739A	1372.73013.3	3
3739B	1372.73013.3	3
3739C	1372.73013.3	3
C Linha 2080-50734		
2080A 50734A	1.0387.90692	0
2080B 50734B	1. .001	0
2080C 50734C	1. .001	0
C Linha 3938-3941		
3938A 3941A	.26411.4601	1
3938B 3941B	.26411.4601	1
3938C 3941C	.26411.4601	1
C Linha 3941-3955		
3941A 3955A	.0266.14706	1
3941B 3955B	.0266.14706	1
3941C 3955C	.0266.14706	1
C Linha 2080-2076		
20801A2076A	.605521.2093	1
20801B2076B	.605521.2093	1
20801C2076C	.605521.2093	1
C Linha 2093-2080		
2093A 20801A	.807361.6123	1
2093B 20801B	.807361.6123	1
2093C 20801C	.807361.6123	1
C Linha 3955-2105		
3955A 2105A	.02784 .0556	1
3955B 2105B	.02784 .0556	1
3955C 2105C	.02784 .0556	1
C Linha 2105-2093		
2105A 2093A	.0696 .139	1
2105B 2093B	.0696 .139	1
2105C 2093C	.0696 .139	1
C Linha 2105-2747		
2105A 2747	.3995 .1315	0
C Linha 2747-3787		
2747 3787	.1924.24828	0
C Linha 2488-1772		
2488A 1772A	3.65943.1951	0
2488B 1772B	3.65943.1951	0
2488C 1772C	3.65943.1951	0
C Linha 1772-1786		
1772A 1786A	1.47021.2836	0
1772B 1786B	1.47021.2836	0
1772C 1786C	1.47021.2836	0
C Linha 50734-2443		
50734A2443A	2.22121.9394	0
50734B2443B	2.22121.9394	0
50734C2443C	2.22121.9394	0
C Linha 2443-2457		
2443A 2457A	2.3491 2.051	0
2443B 2457B	2.3491 2.051	0
2443C 2457C	2.3491 2.051	0
C Linha 2457-2461		
2457A 2461A	1.85371.6185	0
2457B 2461B	1.85371.6185	0

2457C 2461C	1.85371.6185	0
C Linha 50751-2488		
50751A2488A	.22372.19534	0
50751B2488B	.22372.19534	0
50751C2488C	.22372.19534	0
C Linha 50734-3651		
50734A3651A	.0799.06976	0
50734B3651B	.0799.06976	0
50734C3651C	.0799.06976	0
C Linha 2488-2491		
2488C 2491	3.78733.3068	0
C Linha 1772-2503		
1772A 2503	.81498.71158	0
C Linha 2503-2517		
2503 2517	4.33063.7812	0
C Linha 2551-3588		
2551A 3588A	.6392 .5581	0
2551B 3588B	.6392 .5581	0
2551C 3588C	.6392 .5581	0
C Linha 50751-3986		
50751A3986	.41548.36277	0
2517	672.171491.9	3
2503	6960.14770.	3
1786A	4946.510622.	3
1786B	4946.510622.	3
1786C	4946.510622.	3
C Linha 2062-2059		
2062A 2059A	1.48252.9606	0
2062B 2059B	1.48252.9606	0
2062C 2059C	1.48252.9606	0
C Linha 2076-2062		
2076A 2062A	.515041.0286	0
2076B 2062B	.515041.0286	0
2076C 2062C	.515041.0286	0
C Linha 2062-2426		
2062A 2426A	.92684.80925	0
2062B 2426B	.92684.80925	0
2062C 2426C	.92684.80925	0
C Linha 2076-2430		
2076A 2430A	3.1642.7626	0
2076B 2430B	3.1642.7626	0
2076C 2430C	3.1642.7626	0
2491	773.771679.3	3
2488A	2431.35374.4	3
2488B	2431.35374.4	3
2488C	2431.35374.4	3
C Linha 2059-2045		
2059A 2045A	2.0884.1699	0
2059B 2045B	2.0884.1699	0
2059C 2045C	2.0884.1699	0
1772A	4193.98899.8	3
1772B	4193.98899.8	3
1772C	4193.98899.8	3
3986	9228.118359.	3
2028A	28742.57181.	3
2028B	28742.57181.	3
2028C	28742.57181.	3
3955A	8907.419690.	3
3955B	8907.419690.	3
3955C	8907.419690.	3
3972	4809.910936.	3
2461A	2395.75320.2	3
2461B	2395.75320.2	3
2461C	2395.75320.2	3
2457A	17342.38333.	3
2457B	17342.38333.	3
2457C	17342.38333.	3
C Linha 2426-51146		
2426A 51146	1.26241.1023	0
C Linha 2461-2778		
2461A 2778A	.76704.66972	1
2461B 2778B	.76704.66972	1
2461C 2778C	.76704.66972	1
C Linha 2461-3972		

2461A 3972	1.37431.1999	0
C Linha 2031-2028		
2031A 2028A	.682081.3622	0
2031B 2028B	.682081.3622	0
2031C 2028C	.682081.3622	0
C Linha 3725-2031		
3725A 2031A	.4872.97297	0
3725B 2031B	.4872.97297	0
3725C 2031C	.4872.97297	0
C Linha 2045-3725		
2045A 3725A	.1392.27799	0
2045B 3725B	.1392.27799	0
2045C 3725C	.1392.27799	0
C Linha 2031-2551		
2031A 2551A	1.88561.6464	0
2031B 2551B	1.88561.6464	0
2031C 2551C	1.88561.6464	0
C Linha 2045-3969		
2045A 3969A	.57528.50229	0
2045B 3969B	.57528.50229	0
2045C 3969C	.57528.50229	0
C Linha 3969-50340		
3969A 50340	.5593.48834	0
C Linha 2778-50748		
2778A 50748A	2.57282.2464	0
2778B 50748B	2.57282.2464	0
2778C 50748C	2.57282.2464	0
C Linha 50748-50751		
50748A50751A	1.16651.0185	0
50748B50751B	1.16651.0185	0
50748C50751C	1.16651.0185	0
2443A	4594.710068.	3
2443B	4594.710068.	3
2443C	4594.710068.	3
3651A	9762.21186.	3
3651B	9762.21186.	3
3651C	9762.21186.	3
2080A	5901.313045.	3
2080B	5901.313045.	3
2080C	5901.313045.	3
3787	1975.34366.4	3
2747	1733.137216.	3
2045A	6296.713755.	3
2045B	6296.713755.	3
2045C	6296.713755.	3
50340	2684.36024.9	3
3969A	28742.57181.	3
3969B	28742.57181.	3
3969C	28742.57181.	3
51146	4247.598586.	3
2426A	21950.46579.	3
2426B	21950.46579.	3
2426C	21950.46579.	3
2062A	9944.123740.	3
2062B	9944.123740.	3
2062C	9944.123740.	3
2430A	4686.110735.	3
2430B	4686.110735.	3
2430C	4686.110735.	3
C Linha 3941-2548		
3941A 2548	2.04541.7859	1
C Linha 2548-2582		
2548 2582	4.18683.6556	0
C Linha 2582-2896		
2582 2596	1.3423 1.172	0
C Linha 2596-2608		
2596 2608	3.10012.7068	0
C Linha 2596-2611		
2596 2611	1.43821.2557	0
C Linha 2611-3574		
2611 3574	1.26241.1023	0
C Linha 2582-3990		
2582 3990	1.72581.5069	0
C Linha 50765-4001		

50765 4001	1.83771.6045	0
C Linha 2548-50765		
2548 50765	2.95632.5812	0
3574	4799.710913.	3
2611	14571.38650.	3
2608	1791.4000.6	3
2582	2629.35901.4	3
2548	1552.53556.6	3
3990	7152.915179.	3
4001	7256.815399.	3
50765	5950.515784.	3
C Linha 51726-3878		
51726A3878A	.1064.58824	0
51726B3878B	.1064.58824	0
51726C3878C	.1064.58824	0
C Linha 3878-3881		
3878A 3881A	.0798.44118	0
3878B 3881B	.0798.44118	0
3878C 3881C	.0798.44118	0
C Linha 3881-3895		
3881A 3895A	.40852.2584	0
3881B 3895B	.40852.2584	0
3881C 3895C	.40852.2584	0
C Linha 3895-3907		
3895A 3907A	.39712.1954	0
3895B 3907B	.39712.1954	0
3895C 3907C	.39712.1954	0
C Linha 3907-3911		
3907A 3911A	.24321.3445	0
3907B 3911B	.24321.3445	0
3907C 3911C	.24321.3445	0
C Linha 3911-3924		
3911A 3924A	.19951.1029	0
3911B 3924B	.19951.1029	0
3911C 3924C	.19951.1029	0
C Linha 3924-3938		
3924A 3938A	.36672.0273	0
3924B 3938B	.36672.0273	0
3924C 3938C	.36672.0273	0
C Linha 51726-51712		
51726A51712A	.57528.50229	0
51726B51712B	.57528.50229	0
51726C51712C	.57528.50229	0
C Linha 50077-2014		
50077A2014A	.0019 .0105	0
50077B2014B	.0019 .0105	0
50077C2014C	.0019 .0105	0
C Linha 2014-3833		
2014A 3833A	.0019 .0105	0
2014B 3833B	.0019 .0105	0
2014C 3833C	.0019 .0105	0
C Linha 3833-3851		
3833A 3851A	.0019 .0105	0
3833B 3851B	.0019 .0105	0
3833C 3851C	.0019 .0105	0
C Linha 3833-3864		
3833A 3864A	.02088 .0417	0
3833B 3864B	.02088 .0417	0
3833C 3864C	.02088 .0417	0
C Linha 0-3847		
0A 3847A	.191.0504	1
0B 3847B	.191.0504	1
0C 3847C	.191.0504	1
C Linha 3847-50077		
3847A 50077A	.0019 .0105	0
3847B 50077B	.0019 .0105	0
3847C 50077C	.0019 .0105	0
C Linha 3851-51726		
3851A 51726A	.0095.05252	0
3851B 51726B	.0095.05252	0
3851C 51726C	.0095.05252	0
3938A	18145.40109.	3
3938B	18145.40109.	3
3938C	18145.40109.	3

3851A	47190.83450.	3
3851B	47190.83450.	3
3851C	47190.83450.	3
2521A	9307.620574.	3
2521B	9307.620574.	3
2521C	9307.620574.	3
2824A	6240.413632.	3
2824B	6240.413632.	3
2824C	6240.413632.	3
3742A	3270.77144.8	3
3742B	3270.77144.8	3
3742C	3270.77144.8	3

## C Cap nó 2153

2153A	.0001 1.3929	3
2153B	.0001 1.3929	3
2153C	.0001 1.3929	3
2167A	.0001 1.3929	3
2167B	.0001 1.3929	3
2167C	.0001 1.3929	3
22891A	.0001 1.3929	3
22891B	.0001 1.3929	3
22891C	.0001 1.3929	3
2304A	.0001 1.3929	3
2304B	.0001 1.3929	3
2304C	.0001 1.3929	3
1738A	.0001 1.3929	3
1738B	.0001 1.3929	3
1738C	.0001 1.3929	3
2687A	.0001 1.3929	3
2687B	.0001 1.3929	3
2687C	.0001 1.3929	3

## C cap nó 24799

24799A	.0001 1.3929	3
24799B	.0001 1.3929	3
24799C	.0001 1.3929	3
24801A	.0001 1.3929	3
24801B	.0001 1.3929	3
24801C	.0001 1.3929	3
24814A	.0001 1.3929	3
24814B	.0001 1.3929	3
24814C	.0001 1.3929	3

## C cap nó 51055

51055A	.0001 1.3929	3
51055B	.0001 1.3929	3
51055C	.0001 1.3929	3
2136A	.0001 2.7857	3
2136B	.0001 2.7857	3
2136C	.0001 2.7857	3
3739A	.0001 2.7857	3
3739B	.0001 2.7857	3
3739C	.0001 2.7857	3
3791A	.0001 2.7857	3
3791B	.0001 2.7857	3
3791C	.0001 2.7857	3
24828A	.0001 2.7857	3
24828B	.0001 2.7857	3
24828C	.0001 2.7857	3
3941A	.0001 5.5715	3
3941B	.0001 5.5715	3
3941C	.0001 5.5715	3
39551A	.0001 5.5715	3
39551B	.0001 5.5715	3
39551C	.0001 5.5715	3

## C cap nó 2140

2140A	.0001 1.3929	3
2140B	.0001 1.3929	3
2140C	.0001 1.3929	3
2119A	.0001 2.7857	3
2119B	.0001 2.7857	3
2119C	.0001 2.7857	3
XX0930	1.2 .6	0

/SWITCH

C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >  
 21191A2119A MEASURING 1



21191B2119B	MEASURING	1
21191C2119C	MEASURING	1
22891A2289A	MEASURING	1
22891B2289B	MEASURING	1
22891C2289C	MEASURING	1
21531A2153A	MEASURING	1
21531B2153B	MEASURING	1
21531C2153C	MEASURING	1
20801A2080A	MEASURING	1
20801B2080B	MEASURING	1
20801C2080C	MEASURING	1
21361A2136A	MEASURING	1
21361B2136B	MEASURING	1
21361C2136C	MEASURING	1
3955A 39551A	MEASURING	1
3955B 39551B	MEASURING	1
3955C 39551C	MEASURING	1
24801A24811A	MEASURING	1
24801B24811B	MEASURING	1
24801C24811C	MEASURING	1

/SOURCE

C < n l><< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >

142977A -1 0.0402814	120.	0.0		
142977A -1 3.1423784	180.	0.0		
142977A -10.02447834	240.	0.0		
142977A -1 -3. 300.	0.0			
142977A -1 0.013824	360.	0.0		
142977A -1 0.860004	420.	0.0		
142977A -1 0.0063484	480.	0.0		
142977A -1 0.3803686	540.	0.0		
142977A -12.69752E-5	600.	0.0		
142977A -10.02552074	660.	0.0		
142977B -10.06201342	120.	120.		
142977B -13.67253432	180.	0.0		
142977B -10.03945672	240.	-120.		
142977B -1 -3. 300.	120.			
142977B -10.09510711	360.	0.0		
142977B -1 3.3678992	420.	-120.		
142977B -10.19035997	480.	120.		
142977B -10.31095969	540.	0.0		
142977B -1 0.0018708	600.	-120.		
142977B -1 0.0408582	660.	120.		
140A 8256.10885	60.		-1.	1.
18XX0930 1.0				
140B 8256.10885	60.	-120.	-1.	1.
18XX0930 1.0				
142977C -10.04152656	120.	-120.		
142977C -13.94995976	180.	0.0		
142977C -10.07332096	240.	120.		
142977C -1 -4. 300.	-120.			
142977C -1 0.010951	360.	0.0		
142977C -1 1.3479406	420.	120.		
142977C -10.01951929	480.	-120.		
142977C -10.30956218	540.	0.0		
142977C -1 0.020603	600.	120.		
142977C -10.00938112	660.	-120.		
142929A -1 0.068806	120.	0.0		
142929A -1 7.803328	180.	0.0		
142929A -1 0.0357878	240.	0.0		
142929A -12.52012292	300.	0.0		
142929A -1 0.017145	360.	0.0		
142929A -10.98769072	420.	0.0		
142929A -1 0.006904	480.	0.0		
142929A -1 0.4511122	540.	0.0		
142929A -1 1.3643E-5	600.	0.0		
142929A -1 0.3474698	660.	0.0		
142929B -1 0.012991	120.	120.		
142929B -12.51731996	180.	0.0		
142929B -1 0.0192431	240.	-120.		
142929B -10.97413144	300.	120.		
142929B -10.06024337	360.	0.0		
142929B -1 2.142511	420.	-120.		
142929B -10.09512245	480.	120.		
142929B -10.30723405	540.	0.0		

142929B -1 7.721E-4	600.	-120.		
142929B -1 0.415574	660.	120.		
142929C -10.01078238	120.	-120.		
142929C -1 2.1700908	180.	0.0		
142929C -1 0.0514963	240.	120.		
142929C -12.94218612	300.	-120.		
142929C -1 -0.71053	360.	0.0		
142929C -1 2.1456823	420.	120.		
142929C -10.09223717	480.	-120.		
142929C -10.30240017	540.	0.0		
142929C -1 0.007204	600.	120.		
142929C -10.09816084	660.	-120.		
142213A -1 0.0117441	120.	0.0		
142213A -1 1.0896224	180.	0.0		
142213A -10.00128154	240.	0.0		
142213A -10.85428444	300.	0.0		
142213A -1 0.0049432	360.	0.0		
142213A -10.21437094	420.	0.0		
142213A -1 0.0017965	480.	0.0		
142213A -10.07231066	540.	0.0		
142213A -19.12649E-5	600.	0.0		
142213A -10.00715836	660.	0.0		
142213B -10.02521966	120.	120.		
142213B -14.31832535	180.	0.0		
142213B -10.03828772	240.	-120.		
142213B -11.98043493	300.	120.		
142213B -10.00810181	360.	0.0		
142213B -10.23522062	420.	-120.		
142213B -10.00357286	480.	120.		
142213B -1 0.0572308	540.	0.0		
142213B -1 0.0018036	600.	-120.		
142213B -10.02391286	660.	120.		
142213C -10.02116966	120.	-120.		
142213C -12.99143056	180.	0.0		
142213C -1 0.0252146	240.	120.		
142213C -1 1.7847484	300.	-120.		
142213C -1 0.0076785	360.	0.0		
142213C -1 0.2651486	420.	120.		
142213C -1 0.0039868	480.	-120.		
142213C -10.09430874	540.	0.0		
142213C -1 1.5677E-4	600.	120.		
142213C -1 0.0291286	660.	-120.		
140C 8256.10885	60.	120.	-1.	1.
18XX0930 1.0				
142198A -1 0.0194096	120.	0.0		
142198A -1 2.3502388	180.	0.0		
142198A -10.01249723	240.	0.0		
142198A -10.98426232	300.	0.0		
142198A -1 0.0081856	360.	0.0		
142198A -1 0.4328914	420.	0.0		
142198A -1 0.0048553	480.	0.0		
142198A -10.09475637	540.	0.0		
142198A -1 6.9526E-4	600.	0.0		
142198A -10.01322033	660.	0.0		
142397A -1 0.0193267	120.	0.0		
142397A -1 1.74	180.	0.0		
142397A -10.00512102	240.	0.0		
142397A -1 1.	300.	0.0		
142397A -1 0.0064909	360.	0.0		
142397A -1 0.5	420.	0.0		
142397A -1 0.002943	480.	0.0		
142397A -10.48380046	540.	0.0		
142397A -1 2.4401E-5	600.	0.0		
142397A -1 1.0082606	660.	0.0		
142397B -1 0.0310613	120.	120.		
142397B -1 1.624	180.	0.0		
142397B -1 0.0211765	240.	-120.		
142397B -1 0.83	300.	120.		
142397B -10.03035474	360.	0.0		
142397B -1 1.764	420.	-120.		
142397B -10.08043077	480.	120.		
142397B -10.61093082	540.	0.0		
142397B -1 9.76E-4	600.	-120.		
142397B -1 1.021022	660.	120.		

142397C -10.01908566 120. -120.  
 142397C -1 1.44 180. 0.0  
 142397C -10.02183688 240. 120.  
 142397C -1 1.8 300. -120.  
 142397C -1 0.0056231 360. 0.0  
 142397C -1 1.05 420. 120.  
 142397C -10.00929218 480. -120.  
 142397C -10.70931544 540. 0.0  
 142397C -1 0.011454 600. 120.  
 142397C -11.00012102 660. -120.  
 142198B -1 0.010991 120. 120.  
 142198B -1 1.731996 180. 0.0  
 142198B -1 0.0312431 240. -120.  
 142198B -1 1.7413144 300. 120.  
 142198B -1 0.0034337 360. 0.0  
 142198B -1 0.1042511 420. -120.  
 142198B -10.00122452 480. 120.  
 142198B -1 0.023405 540. 0.0  
 142198B -1 7.721E-4 600. -120.  
 142198B -1 0.0015574 660. 120.  
 142198C -1 0.0978238 120. -120.  
 142198C -1 1.9900908 180. 0.0  
 142198C -1 -0.014963 240. 120.  
 142198C -1 1.4218612 300. -120.  
 142198C -1 -0.071053 360. 0.0  
 142198C -1 0.1456823 420. 120.  
 142198C -1 0.0023171 480. -120.  
 142198C -10.09240017 540. 0.0  
 142198C -1 0.07204 600. 120.  
 142198C -1 0.0160843 660. -120.  
 142720A -1 0.046278 120. 0.0  
 142720A -1 5.673544 180. 0.0  
 142720A -1 0.0263119 240. 0.0  
 142720A -12.53151416 300. 0.0  
 142720A -1 0.024733 360. 0.0  
 142720A -10.98738139 420. 0.0  
 142720A -1 0.01392 480. 0.0  
 142720A -1 0.312071 540. 0.0  
 142720A -17.30518E-5 600. 0.0  
 142720A -1 0.0483679 660. 0.0  
 142778A -1 0.063131 120. 0.0  
 142778A -1 7.31036 180. 0.0  
 142778A -1 0.0267315 240. 0.0  
 142778A -1 2.06134 300. 0.0  
 142778A -1 0.020977 360. 0.0  
 142778A -1 0.9857626 420. 0.0  
 142778A -1 0.009601 480. 0.0  
 142778A -1 0.31228 540. 0.0  
 142778A -1 1.4314E-4 600. 0.0  
 142778A -1 0.0584429 660. 0.0  
 142778B -10.04821471 120. 120.  
 142778B -12.97577904 180. 0.0  
 142778B -10.03242944 240. -120.  
 142778B -11.63772936 300. 120.  
 142778B -10.09075515 360. 0.0  
 142778B -1 2.2615674 420. -120.  
 142778B -10.00484225 480. 120.  
 142778B -10.08184251 540. 0.0  
 142778B -1 0.0013592 600. -120.  
 142778B -1 0.0290674 660. 120.  
 142778C -10.06329805 120. -120.  
 142778C -1 7.339276 180. 0.0  
 142778C -1 0.0961622 240. 120.  
 142778C -1 4.245464 300. -120.  
 142778C -1 0.019192 360. 0.0  
 142778C -1 2.660106 420. 120.  
 142778C -10.01819981 480. -120.  
 142778C -1 0.197414 540. 0.0  
 142778C -1 0.0038529 600. 120.  
 142778C -1 0.0272872 660. -120.  
 C 3.2548064  
 142076A -1 0.0246114 120. 0.0  
 142076A -1 3.2548064 180. 0.0  
 142076A -1 0.0259184 240. 0.0

142076A -10.20729796	300.	0.0
142076A -1 0.00809	360.	0.0
142076A -11.76294963	420.	0.0
142076A -1 0.0036928	480.	0.0
142076A -10.09475186	540.	0.0
142076A -1 5.382E-5	600.	0.0
142076A -1 0.7326744	660.	0.0
142076B -10.03952702	120.	120.
142076B -12.15041163	180.	0.0
142076B -1-0.0216664	240.	-120.
142076B -11.85312244	300.	120.
142076B -10.09505196	360.	0.0
142076B -11.81799676	420.	-120.
142076B -10.00504821	480.	120.
142076B -10.19072926	540.	0.0
142076B -1 9.359E-4	600.	-120.
142076B -1 0.0200076	660.	120.
142076C -10.01081708	120.	-120.
142076C -10.31956277	180.	0.0
142076C -1-0.0416917	240.	120.
142076C -1 2.5361752	300.	-120.
142076C -1 0.0052974	360.	0.0
142076C -12.61791408	420.	120.
142076C -10.01392758	480.	-120.
142076C -10.20296552	540.	0.0
142076C -1 0.0010604	600.	120.
142076C -10.00420121	660.	-120.
142720B -1 0.0977401	120.	120.
142720B -1 13.046156	180.	0.0
142720B -1 0.1908839	240.	-120.
142720B -13.98564884	300.	120.
142720B -10.00913719	360.	0.0
142720B -1 2.212196	420.	-120.
142720B -10.08195679	480.	120.
142720B -1 0.951981	540.	0.0
142720B -1 0.0060687	600.	-120.
142720B -1 0.134726	660.	120.
142720C -1 0.0742601	120.	-120.
142720C -18.99652808	180.	0.0
142720C -1 0.0968148	240.	120.
142720C -1 5.9324812	300.	-120.
142720C -1 -0.019178	360.	0.0
142720C -1 2.791138	420.	120.
142720C -10.01921804	480.	-120.
142720C -1 0.2129724	540.	0.0
142720C -1 4.0478E-4	600.	120.
142720C -1 0.0387679	660.	-120.
142366A -1 0.01299	120.	0.0
142366A -1 1.3	180.	0.0
142366A -10.00515199	240.	0.0
142366A -1 0.7	300.	0.0
142366A -1 0.0090106	360.	0.0
142366A -1 0.54	420.	0.0
142366A -1 0.0030709	480.	0.0
142366A -1 0.0829769	540.	0.0
142366A -1 2.82E-5	600.	0.0
142366A -1 0.020148	660.	0.0
142366B -10.04148615	120.	120.
142366B -1 1.771	180.	0.0
142366B -10.04204076	240.	-120.
142366B -1 1.4	300.	120.
142366B -10.07024704	360.	0.0
142366B -1 1.764	420.	-120.
142366B -1 0.0036869	480.	120.
142366B -10.11096473	540.	0.0
142366B -1 0.0011455	600.	-120.
142366B -1 0.0253516	660.	120.
142366C -1 0.0241904	120.	-120.
142366C -1 1.61	180.	0.0
142366C -10.03161956	240.	120.
142366C -1 0.5396684	300.	-120.
142366C -1 0.0059117	360.	0.0
142366C -1 1.53	420.	120.
142366C -10.00928861	480.	-120.

142366C -10.19093027	540.	0.0
142366C -1 9.395E-5	600.	120.
142366C -10.00207816	660.	-120.
142565A -1 0.028393	120.	0.0
142565A -1 2.0631	180.	0.0
142565A -1 0.026167	240.	0.0
142565A -1 -2.	300.	0.0
142565A -1 0.008827	360.	0.0
142565A -10.64391895	420.	0.0
142565A -1 0.0042237	480.	0.0
142565A -1 0.0852127	540.	0.0
142565A -11.46933E-4	600.	0.0
142565A -1 0.214723	660.	0.0
142565B -1 0.0322376	120.	120.
142565B -1 3.838608	180.	0.0
142565B -1 0.0732493	240.	-120.
142565B -1-1.4189781	300.	120.
142565B -1 0.0069448	360.	0.0
142565B -10.15313093	420.	-120.
142565B -10.00248247	480.	120.
142565B -1 0.051608	540.	0.0
142565B -1 0.0017915	600.	-120.
142565B -1 0.3534043	660.	120.
142565C -1-0.0043657	120.	-120.
142565C -1 5.818748	180.	0.0
142565C -1 0.06579	240.	120.
142565C -1-2.8321972	300.	-120.
142565C -1 -0.035481	360.	0.0
142565C -1 0.455013	420.	120.
142565C -1 0.0071199	480.	-120.
142565C -1 0.1074883	540.	0.0
142565C -1 0.02319	600.	120.
142565C -1 0.449953	660.	-120.
142349A -1 0.017076	120.	0.0
142349A -1 2.	180.	0.0
142349A -10.00514386	240.	0.0
142349A -1 0.65	300.	0.0
142349A -1 0.001695	360.	0.0
142349A -1 0.7	420.	0.0
142349A -1 0.0023112	480.	0.0
142349A -1 0.0729737	540.	0.0
142349A -1 2.5942E-6	600.	0.0
142349A -1 0.019841	660.	0.0
142349B -1 0.0512693	120.	120.
142349B -1 3.	180.	0.0
142349B -1 0.0514964	240.	-120.
142349B -1 1.4	300.	120.
142349B -1 0.0901496	360.	0.0
142349B -1 1.76	420.	-120.
142349B -1 0.0025507	480.	120.
142349B -1 0.0911761	540.	0.0
142349B -1 0.001152	600.	-120.
142349B -1 0.019076	660.	120.
142349C -10.02110835	120.	-120.
142349C -1 1.91	180.	0.0
142349C -1 0.0414107	240.	120.
142349C -1 0.35	300.	-120.
142349C -1 0.005536	360.	0.0
142349C -1 1.1	420.	120.
142349C -1 0.0228778	480.	-120.
142349C -1 0.1092941	540.	0.0
142349C -1 9.229E-4	600.	120.
142349C -1 0.0019557	660.	-120.
142321A -1 0.044884	120.	0.0
142321A -1 3.9648924	180.	0.0
142321A -1 0.0122339	240.	0.0
142321A -1 1.5099836	300.	0.0
142321A -1 0.006277	360.	0.0
142321A -10.45320569	420.	0.0
142321A -1 0.00171	480.	0.0
142321A -1 0.3953571	540.	0.0
142321A -1 -0.00312	600.	0.0
142321A -1 0.7133959	660.	0.0
142321B -10.08743938	120.	120.

142321B -1	9.467728	180.	0.0
142321B -1	0.0754438	240.	-120.
142321B -1	1.9759392	300.	120.
142321B -1	0.0245873	360.	0.0
142321B -1	2.627218	420.	-120.
142321B -1	0.0092	480.	120.
142321B -1	0.9103402	540.	0.0
142321B -1	0.0042398	600.	-120.
142321B -1	0.767618	660.	120.
142321C -1	0.0096402	120.	-120.
142321C -1	4.848232	180.	0.0
142321C -1	0.0616852	240.	120.
142321C -1	0.636248	300.	-120.
142321C -1	0.002002	360.	0.0
142321C -1	2.2331592	420.	120.
142321C -1	0.0093909	480.	-120.
142321C -1	0.4038638	540.	0.0
142321C -1	0.0014785	600.	120.
142321C -1	0.7125092	660.	-120.
142080A -1	0.028246	120.	0.0
142080A -1	7.	180.	0.0
142080A -1	0.026363	240.	0.0
142080A -1	-1.4940724	300.	0.0
142080A -1	0.0078201	360.	0.0
142080A -10.97338306		420.	0.0
142080A -1	0.005769	480.	0.0
142080A -1	0.0856494	540.	0.0
142080A -1	1.0316E-4	600.	0.0
142080A -1	0.43832	660.	0.0
142080B -10.03926238		120.	120.
142080B -1	3.564116	180.	0.0
142080B -1	-0.574233	240.	-120.
142080B -1	2.123754	300.	120.
142080B -10.09088918		360.	0.0
142080B -1	0.7288661	420.	-120.
142080B -10.08027437		480.	120.
142080B -10.09847628		540.	0.0
142080B -1	0.0016143	600.	-120.
142080B -1	0.73214	660.	120.
142080C -1	0.0316939	120.	-120.
142080C -1	4.60572	180.	0.0
142080C -1	-0.6520879	240.	120.
142080C -1	2.81578	300.	-120.
142080C -1	0.010611	360.	0.0
142080C -1	2.288375	420.	120.
142080C -1	0.0304826	480.	-120.
142080C -1	0.2047975	540.	0.0
142080C -1	0.0012302	600.	120.
142080C -10.63832544		660.	-120.
142289A -1	0.029036	120.	0.0
142289A -1	0.528876	180.	0.0
142289A -1	0.0380961	240.	0.0
142289A -1	2.682664	300.	0.0
142289A -1	0.019355	360.	0.0
142289A -1	0.7611881	420.	0.0
142289A -1	0.007935	480.	0.0
142289A -1	0.067429	540.	0.0
142289A -1	7.3975E-5	600.	0.0
142289A -1	0.145001	660.	0.0
142289B -1	-0.0086498	120.	120.
142289B -12.11997952		180.	0.0
142289B -1	0.0875152	240.	-120.
142289B -13.39030028		300.	120.
142289B -1	0.018882	360.	0.0
142289B -1	0.540312	420.	-120.
142289B -1	0.010395	480.	120.
142289B -1	0.0958408	540.	0.0
142289B -1	-0.001139	600.	-120.
142289B -1	0.131392	660.	120.
142289C -10.04214614		120.	-120.
142289C -1	1.746024	180.	0.0
142289C -1	0.095824	240.	120.
142289C -1	2.013836	300.	-120.
142289C -1	0.022221	360.	0.0

142289C -1 0.558844	420.	120.
142289C -1 0.0094883	480.	-120.
142289C -1 0.1064776	540.	0.0
142289C -1 0.042237	600.	120.
142289C -1 0.12734	660.	-120.
1421531A-1 -0.001927	120.	0.0
1421531A-1 -60.872346	180.	0.0
1421531A-1 0.0140694	240.	0.0
1421531A-1 -2.4030312	300.	0.0
1421531A-1 0.008771	360.	0.0
1421531A-1 0.9975434	420.	0.0
1421531A-1 1.824E-4	480.	0.0
1421531A-10.00531236	540.	0.0
1421531A-1 -0.015359	600.	0.0
1421531A-1 -0.12179	660.	0.0
1421531B-1 -9.1082E-4	120.	120.
1421531B-1 -19.491	180.	0.0
1421531B-1 -0.104542	240.	-120.
1421531B-1 -9.83644	300.	120.
1421531B-1 -0.0965614	360.	0.0
1421531B-1 -2.515155	420.	-120.
1421531B-1 -0.037307	480.	120.
1421531B-1 -0.3167	540.	0.0
1421531B-1 -0.005521	600.	-120.
1421531B-1 -0.094156	660.	120.
1421531C-1 -0.008184	120.	-120.
1421531C-1 -38.403368	180.	0.0
1421531C-1 0.0286631	240.	120.
1421531C-1 -1.6677224	300.	-120.
1421531C-1 -0.067243	360.	0.0
1421531C-116.8049071	420.	120.
1421531C-1 -0.001501	480.	-120.
1421531C-1 -0.011192	540.	0.0
1421531C-1 -2.312415	600.	120.
1421531C-1 0.0949747	660.	-120.
142136A -1 -0.28839	120.	0.0
142136A -1 19.589104	180.	0.0
142136A -1 -0.11684	240.	0.0
142136A -1 1.7391244	300.	0.0
142136A -1 0.014374	360.	0.0
142136A -13.99814786	420.	0.0
142136A -1 0.00521	480.	0.0
142136A -1 1.841874	540.	0.0
142136A -1 -0.10383	600.	0.0
142136A -1 0.4640834	660.	0.0
142136B -1 -0.0108244	120.	120.
142136B -1 -9.491	180.	0.0
142136B -1 -0.0204542	240.	-120.
142136B -1 3.83644	300.	120.
142136B -1 -0.0865614	360.	0.0
142136B -1 -0.2515155	420.	-120.
142136B -1 -0.037307	480.	120.
142136B -1 1.6167	540.	0.0
142136B -1 -0.005521	600.	-120.
142136B -1 0.194156	660.	120.
142136C -1 0.008184	120.	-120.
142136C -112.7403368	180.	0.0
142136C -1 0.0286631	240.	120.
142136C -1 -5.6677224	300.	-120.
142136C -1 -0.067243	360.	0.0
142136C -1 -18.504907	420.	120.
142136C -1 -0.001501	480.	-120.
142136C -1 1.511192	540.	0.0
142136C -1 2.312415	600.	120.
142136C -1 0.89747	660.	-120.
1450902A-1 0.1	120.	0.0
1450902A-1 17.	180.	0.0
1450902A-1 0.247	240.	0.0
1450902A-1 8.5	300.	0.0
1450902A-1 0.1641	360.	0.0
1450902A-1 5.97417	420.	0.0
1450902A-1 0.08	480.	0.0
1450902A-1 0.9484	540.	0.0
1450902A-1 0.002	600.	0.0

```
1450902A-1 1.77 660. 0.0
1450902B-1-2.6498E-5 120. 120.
1450902B-12.19897952 180. 0.0
1450902B-1 0.0875152 240. -120.
1450902B-13.63030028 300. 120.
1450902B-1 0.018882 360. 0.0
1450902B-1 0.540312 420. -120.
1450902B-1 0.010395 480. 120.
1450902B-1 0.0958408 540. 0.0
1450902B-1 -0.001139 600. -120.
1450902B-1 1.631392 660. 120.
1450902C-1 0.0194614 120. -120.
1450902C-11.21946024 180. 0.0
1450902C-1 0.095824 240. 120.
1450902C-1 2.7013836 300. -120.
1450902C-1 0.022221 360. 0.0
1450902C-1 0.558844 420. 120.
1450902C-1 0.0094883 480. -120.
1450902C-1 0.1064776 540. 0.0
1450902C-1 0.0042237 600. 120.
1450902C-1 1.412734 660. -120.
143941A -1 0.04074 120. 0.0
143941A -1 6.85 180. 0.0
143941A -1 -0.3925 240. 0.0
143941A -1 1.0544 300. 0.0
143941A -1 0.021825 360. 0.0
143941A -1 0.986882 420. 0.0
143941A -1 0.011 480. 0.0
143941A -1 0.112 540. 0.0
143941A -1 2.9E-4 600. 0.0
143941A -1 0.777 660. 0.0
/OUTPUT
0A 0B 0C 3938A 3938B 3938C 3941A 3941B 3941C
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
```