unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

MESTRADO

"DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE FILTROS PASSIVOS"

Lídia Luciana Ravagnani

1210001538

Ilha Solteira - SP

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

Dimensionamento Otimizado de Filtros Passivos

1210001538

Lídia Ravagnani

Luís Carlos Origa de Oliveira

Orientador

Proc. 055/05-NRD 003/05

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"
SERVIÇO TÉC. DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO

DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBO
26.11.04	28.02.05
REGISTRADO POR	TOMBO
Aliça	Te. 1538
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
Doação R$ 10.00 Aluna	R252d

Dissertação submetida à Universidade Estadual Paulista – UNESP, Câmpus de Ilha Solteira, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Ilha Solteira - SP, agosto de 2004.

Co sys 322688
sys 58853

BCpIS - FEIS - UNESP

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP-Ilha Solteira

Ravagnani, Lídia
R252d Dimensionamento otimizado de filtros passivos / Lídia Ravagnani. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2004
xxi, 121p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2004

Orientador: Luís Carlos Origa de Oliveira
Bibliografia: p. 107-110

1. Filtros elétricos passivos. 2. Filtros harmônicos. 3. Sistemas de energia elétrica - Proteção

30404002

Dimensionamento Otimizado de Filtros Passivos

Lidia Luciana Ravagnani

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. Aparecido Augusto de Carvalho
Coordenador do Programa de Pós–Graduação
em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Luís Carlos Origa de Oliveira - orientador

Prof. Dr. Osmar Ogashawara

Prof. Dr. Dalgerti Lelis Milanèse

Ilha Solteira-SP, agosto de 2004.

BCpIS - FEIS - UNESP

"De tudo ficaram três coisas:
A certeza de estar sempre começando,
A certeza de que é preciso continuar e
A certeza de ser interrompido antes de terminar...
Fazer da interrupção um caminho novo,
Da queda um passo de dança,
Do medo uma escada,
Do sonho uma ponte,
Da procura um encontro."

Encontro Marcado – Fernando Sabino

BCpIS - FEIS - UNESP

AGRADECIMENTOS

A Deus, especialmente.

Aos meus pais, José Pedro e Lenilde, por renunciarem a seus sonhos a favor dos meus. E por me terem me ensinado o valor da consciência e dignidade.

Ao professor Luís Carlos Origa de Oliveira, pela orientação, dedicação e estímulo. E pela amizade, companheirismo e confiança em mim depositada.

Aos amigos que conquistei, pelos anos que passamos juntos em busca de um mesmo objetivo.

À Universidade Estadual Paulista – UNESP, que proporcionou a realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio financeiro a este trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS ix

LISTA DE TABELAS xii

SIMBOLOGIA xiv

ABREVIATURAS xviii

RESUMO xx

ABSTRACT xxi

INTRODUÇÃO GERAL 01

CAPÍTULO 1 – Conceitos e Definições 05

1.1– Introdução 05

1.2–Harmônicas 05

1.2.1 - Definições Aplicáveis 06

1.2.2 – Formulações 07

1.3 – Supressores de Harmônicas 08

1.3.1 – Supressores Harmônicos Passivos 08

1.3.1.1 – Filtros Harmônicos Amortecidos 12

1.3.2 – Supressores Harmônicos Ativos 13

BCpIS - FEIS - UNESP

1.3.3 – Supressores Harmônicos Híbridos..... 15
1.3.4 – Aperfeiçoamento dos Filtros Harmônicos Ressonantes..... 16
1.4 – Conclusões..... 17

CAPÍTULO 2 – Normas e Recomendações..... 19
2.1 – Introdução..... 19
2.2 - Histórico da Legislação Internacional..... 19
2.3 – Histórico da Legislação Nacional..... 21
2.4 – Recomendações e Normas Consultadas..... 22
2.4.1 - Recomendação IEEE..... 22
2.4.1.1 - Harmônicas de Tensão..... 22
2.4.1.2 - Harmônicas de Corrente..... 23
2.4.1.3 - Atribuição de Responsabilidades..... 25
2.4.1.3.1 - Responsabilidades da Concessionária..... 25
2.4.1.3.2 - Responsabilidades do Consumidor..... 26
2.4.2 - Recomendações IEC..... 26
2.4.3- Recomendações GCOI/GCPS..... 27
2.4.4 - Norma Européia CENELEC..... 27
2.4.5 - Norma Sul-Africana NRS..... 28
2.4.6 - Norma Peruana NTCSE..... 29
2.5 – Quadro Comparativo..... 30
2.6 – ONS (Operador Nacional do Sistema)..... 31
2.6.1 - Distorção Harmônica..... 32
2.7 – Conclusões..... 33

CAPÍTULO 3 – Modelo Matemático e Índices de Desempenho..... 35
3.1 – Introdução..... 35
3.2 – Modelo Matemático..... 36
3.2.1 – Transmitâncias do Filtro Harmônico Ressonante..... 39
3.2.1.1- Relação entre as Harmônicas da Corrente da Carga e da Corrente de Alimentação..... 40
3.2.1.2 - Relação entre as Harmônicas da Tensão de Alimentação e da Tensão na Carga..... 41

3.2.1.3 - Relação entre as Harmônicas da Tensão e Corrente de Alimentação..... 43
3.2.1.4- Relação entre as Harmônicas da Tensão e Corrente na Carga..... 45
3.3 – Índices para Avaliação da Performance do Filtro..... 46
3.3.1 – Índices Relacionados com os Efeitos sobre a Corrente de Alimentação..... 47
3.3.2 – Índices Relacionados com os Efeitos sobre a Tensão no Barramento da Carga..... 48
3.3.3 – Índices Compostos DTHT e DIHT..... 49
3.4 – Conclusões..... 51

CAPÍTULO 4 – Implementação Computacional e Estudo de Casos..... 52
4.1 – Introdução..... 52
4.2 – Metodologia para o Dimensionamento do Sistema de Filtragem..... 53
4.2.1 – Implementação Computacional..... 54
4.3 – Influência dos Parâmetros do Sistema Alimentador e da Carga..... 59
4.3.1 – Impedância da Carga..... 60
4.3.2 – Impedância do Sistema Alimentador..... 61
4.4 – Estudo de Casos..... 62
4.4.1 – CASO 1 - Desempenho da Filtragem em Condições Idealizadas..... 62
4.4.2 – CASO 2 – Desempenho da Filtragem com Harmônicas Remanescentes..... 65
4.4.3 – CASO 3 – Desempenho da Filtragem com Harmônicas na Tensão de Alimentação..... 68
4.4.4 – CASO 4 – Desempenho da Filtragem com Harmônicas Remanescentes e Distorção na Tensão de Alimentação..... 71
4.4.5 – CASO 5 – Desempenho da Filtragem com Harmônicas Remanescentes e Distorção na Tensão de Alimentação..... 74
4.5 – Conclusões..... 77

CAPÍTULO 5 – Diretrizes para o Dimensionamento Otimizado..... 79
5.1 – Introdução..... 79
5.2 – Alteração das Transmitâncias do Sistema de Filtragem..... 81
5.2.1 - Sobre ou Sub-Compensação da Potência Reativa..... 81

5.2.2 – Alteração da Potência Reativa Alocada por Braço..... 84
5.2.3 – Dessintonia das Freqüências de Ressonância..... 89
5.3 – Otimização da Eficácia do Sistema de Filtragem..... 91
5.3.1 – Caso Base..... 92
5.3.2 – Redistribuição Otimizada da Potência Reativa de Compensação..... 94
5.3.3 – Dessintonia Otimizada dos Braços do Sistema de Filtragem..... 97
5.3.4 – Dessintonia Otimizada dos Braços e Alocação Otimizada da Potência Reativa..... 99
5.4 – Conclusões..... 102

CONCLUSÃO GERAL..... 104

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 107

APÊNDICE I – Aplicativo – Análise e Dimensionamento de Filtros Passivos..... 111

APÊNDICE II – Procedimentos de Cálculo e Dimensionamento..... 119

LISTA DE FIGURAS

Descrição **Página**

Figura 1.1 – Representação da Série de Fourier para uma forma de onda distorcida..... 06
Figura 1.2 – Sistema de filtragem harmônica passiva..... 09
Figura 1.3 - Circuito LC..... 09
Figura 1.4 - Variação da impedância com a freqüência..... 11
Figura 1.5 - Diagrama esquemático de um filtro ativo..... 13
Figura 1.6 - Diagrama esquemático de um filtro híbrido..... 16
Figura 3.1-a- Circuito simplificado para uma das fases no barramento onde o filtro está instalado; .b- Circuito equivalente..... 37
Figura 3.2–a- Componente fundamental; b– Componente distorcida; c – Total..... 38
Figura 3.3 – Fluxo de harmônicas no circuito simplificado..... 39
Figura 3.4 – Circuito equivalente reduzido considerando-se apenas o efeito da fonte de corrente..... 40
Figura 3.5 – Circuito equivalente reduzido considerando-se apenas o efeito da fonte de tensão..... 41
Figura 3.6- Circuito simplificado com dois filtros..... 42
Figura 3.7 – Magnitude das transmitâncias A_{ω}. e B_{ω}..... 43
Figura 3.8 – Circuito equivalente reduzido..... 44
Figura 3.9 – Magnitude da admitância $Y_{x\omega}$..... 44
Figura 3.10 – Circuito equivalente reduzido com a impedância "vista" pelo barramento carga..... 45

Figura 3.11 – Magnitude da impedância $Z_{Y\omega}$..... 46
Figura 4.1 – Sistema teste com carga não-liner e FHR de quatro braços..... 55
Figura 4.2 - Magnitudes das transmitâncias A_ω e B_ω..... 57
Figura 4.3 - Magnitude da transmitância $Y_{x\omega}$..... 57
Figura 4.4 - Magnitude da transmitância $Z_{Y\omega}$..... 58
Figura 4.5. Reatâncias $X_{a\omega}$ e $-X_{s\omega}$ para S_{cc}=28,4, X/R=5, FD=0,71, NC=100%, Q=50, Sl=1pu..... 60
Figura 4.6. Reatâncias $X_{a\omega}$ e $-X_{s\omega}$ para S_{cc}=28,4, X/R=5, FD=0,71, NC=100%, Q=50, Sl=0,5pu..... 61
Figura 4.7 - Transmitâncias das magnitudes A_ω e B_ω, para S_{cc}=100 pu..... 61
Figura 4.8 – Circuito equivalente no ambiente Pspice®..... 62
Figura 4.9 – Resultados Simulados - Caso 1..... 64
Figura 4.10 – Espectros harmônicos de tensões e correntes – Caso 1..... 65
Figura 4.11 – Resultados Simulados - Caso 2..... 67
Figura 4.12 – Espectros harmônicos de tensões e correntes – Caso 2..... 68
Figura 4.13 – Resultados Simulados - Caso 3..... 69
Figura 4.14 – Espectros harmônicos de tensões e correntes – Caso 3..... 70
Figura 4.15 – Resultados Simulados - Caso 4..... 72
Figura 4.16 – Espectros harmônicos de tensões e correntes – Caso 4..... 73
Figura 4.17 – Resultados Simulados - Caso 5..... 75
Figura 4.18 – Espectros harmônicos de tensões e correntes – Caso 5..... 76
Figura 5.1- Reatâncias $X_{a\omega}$ e $-X_{s\omega}$ para S_{cc}=28,4, X/R=5, FD=0,71, NC=100%, Q=50, Sl=1pu..... 82
Figura 5.2 - Reatâncias $X_{a\omega}$ e $-X_{s\omega}$ para S_{cc}=28,4, X/R=5, FD=0,71, NC=50%, Q=50, Sl=1pu..... 82
Figura 5.3 -Transmitâncias A_ω e B_ω para S_{cc}=28,4, X/R=5, FD=0,71, NC=100%, Q=50, Sl=1pu..... 83
Figura 5.4 -Transmitâncias A_ω e B_ω para S_{cc}=28,4, X/R=5, FD=0,71, NC=50%, Q=50, Sl=1pu..... 83

Figura 5.5 –Impedâncias do sistema equivalente..... 85

Figura 5.6 - Reatâncias $X_{a\omega}$ e $-X_{s\omega}$ para S_{cc}=28,4, X/R=5, FD=0,71, NC=100%, Q=50, Sl=1pu (7ª ordem- 70%, 5ª ordem – 20%, 11ª ordem-10%)..... 87

Figura 5.7 -Transmitâncias A_ω e B_ω para S_{cc}=28,4, X/R=5, FD=0,71, NC=100%, Q=50, Sl=1pu (7ª ordem- 70%, 5ª ordem – 20%, 11ª ordem-10%)..... 88

Figura 5.8 - Reatâncias $X_{a\omega}$ e $-X_{s\omega}$ com o filtro de 7ª ordem harmônica dessintonizado em 4Hz para S_{sc}=25, X/R=5, FP=0.7, nível compensação=100% e fator de qualidade Q=50..... 89

Figura 5.9 - Transmitâncias A_ω e B_ω com o filtro de 7ª ordem harmônica dessintonizado em 4Hz para S_{sc}=25, X/R=5, FP=0.7, nível compensação=100% e fator de qualidade Q=50..... 90

Figura 5.10 – Resultados Simulados - Caso base..... 93

Figura 5.11 – Espectros harmônicos de tensões e correntes – Caso base..... 94

Figura 5.12 – Resultados Simulados - Redistribuição otimizada da potência reativa..... 95

Figura 5.13 – Espectros harmônicos de tensões e correntes – Redistribuição otimizada da potência reativa..... 96

Figura 5.14– Resultados Simulados - Dessintonia otimizada..... 99

Figura 5.15 – Espectros harmônicos de tensões e correntes – Dessintonia otimizada..... 99

Figura 5.16 – Resultados Simulados - Redistribuição e dessintonia otimizadas..... 101

Figura 5.17 – Espectros harmônicos de tensões e correntes – Redistribuição e dessintonia otimizadas..... 102

LISTA DE TABELAS

Descrição **Página**

Tabela 2.1 - Limites de distorção harmônica de tensão em % da nominal – IEEE..... 23
Tabela 2.2 - Base para determinação dos limites de distorção harmônica de corrente – IEEE..... 24
Tabela 2. 3 - Limites de distorção harmônica de corrente (I_h) em % de I_L – IEEE..... 24
Tabela 2.4 – Resumo dos índices de conformidade para harmônicos de tensão..... 30
Tabela 2.5 - Limites globais de tensão, expressos em porcentagem da tensão fundamental - ONS..... 32
Tabela 2.6- Limites individuais de tensão, expressos em porcentagem da tensão fundamental – ONS..... 32
Tabela 4.1 – Dados do sistema teste..... 55
Tabela 4.2 – Parâmetros calculados para o sistema teste..... 56
Tabela 4.3 – Dimensionamento dos braços do sistema de filtragem..... 56
Tabela 4.4 – Transmitâncias do filtro para ordens harmônicas..... 58
Tabela 4.5 – Fontes harmônicas (caso 1)..... 63
Tabela 4.6 – Composição harmônica calculada (caso 1)..... 63
Tabela 4.7 – Fontes Harmônicas (caso 2)..... 66
Tabela 4.8 – Composição harmônica calculada (caso 2)..... 66
Tabela 4.9 – Fontes Harmônicas (caso 3)..... 68
Tabela 4.10 – Composição harmônica calculada (caso 3)..... 69
Tabela 4.11 – Fontes Harmônicas (caso 4)..... 71

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

Tabela 4.12 – Composição harmônica calculada (caso 4)..... 72
Tabela 4.13 – Fontes Harmônicas (caso 5)..... 74
Tabela 4.14 – Composição harmônica calculada (caso 5)..... 74
Tabela 5.1 – Transmitâncias harmônicas para diferentes níveis de compensação reativa..... 84
Tabela 5.2 – Transmitâncias harmônicas para diferentes distribuições de compensação reativa..... 88
Tabela 5.3 – Transmitâncias harmônicas para dessintonia na 7ª ordem harmônica.... 90
Tabela 5.4 - Conteúdo harmônico injetado pela carga não-linear e conteúdo harmônico presente na tensão de alimentação do sistema..... 93
Tabela 5.5 – Dimensionamento com otimização da distribuição da potência reativa de compensação 94
Tabela 5.6 – Índices de desempenho..... 95
Tabela 5.7 – Transmitâncias harmônicas para redistribuição otimizada da potência reativa 96
Tabela 5.8 – Dimensionamento com dessintonia otimizada dos braços 97
Tabela 5.9 – Índices de desempenho..... 98
Tabela 5.10 – Transmitâncias harmônicas para redistribuição otimizada da potência reativa 98
Tabela 5.11 – Dimensionamento com redistribuição e dessintonia otimizadas..... 100
Tabela 5.12 – Índices de desempenho..... 100
Tabela 5.13– Transmitâncias harmônicas para dessintonia otimizada dos braços..... 101

SIMBOLOGIA

Símbolo	Significado	Unidade
$F(t)$	Função contínua e periódica	-
F_h	Amplitude da h-ésima componente harmônica	pu
φ_h	Ângulo de fase da h-ésima componente harmônica	°, radiano
F_1	Amplitude da componente fundamental	pu
φ_1	Ângulo de fase da componente fundamental	°, radiano
F_o	Componente constante	pu
V_h	Valor eficaz da tensão harmônica individual de ordem h	pu
I_h	Valor eficaz da corrente harmônica individual de ordem h	pu
h	Ordem harmônica considerada	-
$h_{máx}$	Máxima ordem harmônica considerada	-
V_1	Valor eficaz da tensão fundamental	pu
I_1	Valor eficaz da corrente fundamental	pu
Z_f	Impedância equivalente do filtro na freqüência fundamental	pu
f	Freqüência fundamental	Hz
r	Resistência elétrica do reator	pu
L	Indutância do reator do filtro	Henry
C	Capacitância do filtro	Farad
f_r	Freqüência ressonante ou de sintonia do filtro	Hz
h_r	Ordem harmônica ressonante	-

unesp

f_1	Freqüência fundamental (freqüência da rede).....	Hz
Z_0, Z_L, Z_S	Impedância equivalente do reator do filtro, da carga e do sistema na freqüência fundamental, respectivamente.....	pu
$\overline{Q}$	Fator de qualidade do reator do filtro.....	-
V_n	Valor eficaz da tensão nominal no PAC.....	pu
Scc	Nível de curto-circuito no PAC.....	pu
I_{CC}	Valor eficaz da corrente de curto-circuito.....	pu
I_L	Valor eficaz da Corrente da carga.....	pu
e, u, i, j	Valor instantâneo da tensão do sistema de distribuição, da tensão na carga, da corrente de alimentação e da corrente absorvida pela carga, respectivamente.....	pu
e_1, u_1, i_1, j_1	Valor instantâneo da componente fundamental da tensão do sistema de distribuição, da tensão na carga, da corrente de alimentação, da parcela distorcida da corrente absorvida pela carga, respectivamente.....	pu
e_h, u_h, i_h, j_h	Valor instantâneo da h-ésima componente harmônica da tensão do sistema de distribuição, da tensão na carga, da corrente de alimentação, da parcela distorcida da corrente absorvida pela carga, respectivamente.....	pu
e_d, u_d, i_d, j_d	Valor instantâneo da componente distorcida da tensão do sistema de distribuição, da tensão na carga, da corrente de alimentação, da parcela distorcida da corrente absorvida pela carga, respectivamente.....	pu
e_w, u_w, i_w, j_w	Componente no domínio da freqüência da tensão do sistema de distribuição, da tensão na carga, da corrente de alimentação, da corrente absorvida pela carga, respectivamente.....	pu
E, U, I, J	Valor eficaz da tensão do sistema de distribuição, da tensão na carga, da corrente de alimentação, da corrente absorvida pela carga, respectivamente.....	pu
B_w, A_w	Transmitâncias na freqüência w.....	-
Y_{xw}, Z_{yw}	Transmitâncias na freqüência w.....	pu

$Z_{0\,w}$, Z_{lw}, Z_{sw}, Z_{aw}	Impedância do reator do filtro, da carga, do sistema e do paralelo entre a impedância do filtro e da carga para a freqüência w, respectivamente	pu
$I_d(j_d)$	Valor eficaz da parcela distorcida da corrente de alimentação devido a corrente de carga j_d	pu
Y_{xh}, Z_{yh}	Transmitância para a ordem harmônica h	pu
B_h , A_h	Transmitância para a ordem harmônica h	-
κ_i , κ_e	Índice de susceptibilidade do filtro para as harmônicas de corrente geradas pela carga e para harmônicas da tensão de alimentação, respectivamente	-
E_d, $I_d(e_d)$	Valor eficaz da componente distorcida da tensão de alimentação e da corrente distorcida da corrente de alimentação devido a tensão de alimentação	pu
$\partial_i(j_d)$, $\partial_i(e_d)$	Fator de distorção harmônica da corrente de alimentação, causadas pelas harmônicas da corrente de carga e pelas harmônicas da tensão de alimentação, respectivamente	-
$u_d(j_d)$, $u_{d0}(j_d)$	Tensão distorcida $u_d(j_d)$ nos terminais da carga relacionada com as harmônicas de corrente de carga na presença e na ausência do filtro, respectivamente	pu
$k_u(j_d)$, $k_u(e_d)$	Índice de susceptibilidade de corrente do filtro com respeito a distorção da tensão e a propagação desta distorção entre as tensões consideradas, respectivamente	-
$\partial_u(e_d)$, $\partial_u(j_d)$	Fator de distorção da tensão no barramento da carga, causadas pelas harmônicas da tensão de alimentação e pelas harmônicas da corrente de carga, respectivamente	-
$DIHT_i$, $DTHT_u$	Fator de distorção harmônica global para correntes e tensões, respectivamente	-
Z_{Tw}, R_{Tw}	Transmitância e resistência total equivalentes, respectivamente	pu
X_{Tw}, X_{Aw}, X_{Sw}	Reatância total, reatância do paralelo entre a carga e o filtro e Reatância do sistema equivalente, respectivamente	pu

ω_{REDE}	Freqüência angular da rede.....	rad/seg
X_i	Reatância equivalente do braço i do filtro na freqüência da rede....	pu
h_i	Harmônica de sintonia do braço i.....	-
C_i	Capacitância alocada no braço *i*.....	Farad
L_i	Indutância alocada no braço *i*.....	Henry

LISTA DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
FHP	Filtros Harmônicos Passivos.
FHA	Filtros Harmônicos Ativos.
FHR	Filtros Harmônicos Ressonantes.
FPF	Filtros Passa Faixa.
BH	Bloqueador de Harmônicas.
SHH	Supressores Harmônicos Híbridos.
DTHI	Distorção Harmônica Individual de Tensão.
DIHI	Distorção Harmônica Individual de Corrente.
DTHT	Distorção de Tensão Harmônica Total.
DIHT	Distorção de Corrente Harmônica Total.
PWM	Pulse Width Modulation – Modulação por Largura de Pulso.
HVDC	High Voltage Direct Current – Transmissão em Corrente Contínua.
EMI	Interferência Eletromagnética.
CENELEC	European Commitee for Electrotechnical Standardization.
IEC	International Electrotechnical Commission.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
IAS	Industry Application Society.
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica.
CIGRÉ	Conseil International Des Grands Résesaux Electriques.
IBS	Instituto Brasileiro de Siderurgia.

unesp

ABRACE	Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia.
GCOI	Grupo Coordenador para Operação Interligada.
GCPS	Grupo Coordenador de Planejamento dos Sistemas Elétricos.
PAC	Ponto de Acoplamento Comum.
ONS	Organizador Nacional do Sistema.
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
CA	Corrente Alternada.
CC	Corrente Contínua.

RESUMO

Várias técnicas têm sido utilizadas para a mitigação dos efeitos causados pelas harmônicas nas redes elétricas. Entre elas, destaca-se a utilização de supressores de harmônicas, que podem ser baseados em tecnologias passivas e ativas. Os filtros passivos quando utilizados isoladamente são vistos, às vezes, como dispositivos ultrapassados, se comparados aos filtros ativos. Por outro lado, o uso dos filtros ativos ainda enfrenta alguma resistência por não ser uma tecnologia totalmente dominada e por apresentar um custo de implantação elevado. Estes fatores limitam sua aplicação apenas em instalações de baixa potência. Atualmente, existe uma forte tendência para a concepção de supressores harmônicos híbridos, com o objetivo de aglutinar as vantagens econômicas e operacionais das tecnologias ativa e passiva.

Neste cenário, é imperativo que estudos adicionais sejam encaminhados no sentido de estabelecer metodologias mais refinadas para análise e dimensionamento dos filtros passivos ressonantes, uma vez que estes são partes integrantes dos filtros híbridos e deverão contribuir significativamente na busca da solução mais econômica. Apresenta-se neste trabalho uma proposta de modelagem baseada na resposta em freqüência de quatro transmitâncias para a análise do desempenho operacional de sistemas de filtragem passiva e definição de diretrizes para dimensionamento otimizado dos seus principais componentes.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

ABSTRACT

Several techniques have been used aiming the mitigation of the effects caused by harmonics in the electric networks. Among them, stands out the use of suppressor circuits of harmonics, that can be based on passive and active technologies. Passive filters when used separately are seen, sometimes, as surpassed devices, when compared to active filters. On the other hand, the use of active filters still faces some resistance for not being a completely dominated technology and for presenting a high implantation cost. These factors limit its application only to low power facilities. Nowadays, a strong tendency exists for the conception of hybrid harmonic suppressor circuits, with the objective of agglutinating the economical and operational advantages of active and passive technologies.

In this scenery, it is imperative that additional studies are directed in the sense of establishing more refined methodologies for analysis and sizing of resonant passive filters, once these are integral parts of hybrid filters and they should contribute significantly in the search of the most economical solution. It is presented in this work a model based on frequency response of four transmittances for the analysis of the operational performance of systems of passive filtering and definition of guidelines for optimized sizing of its major components.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

INTRODUÇÃO GERAL

Nos últimos anos, o setor elétrico brasileiro tem passado por profundas mudanças em sua legislação, mudanças estas que visam a criação de um ambiente competitivo, aberto a novos investimentos e que tragam como benefício um melhor atendimento aos consumidores, tanto em qualidade quanto em tarifas mais atraentes [01]. Neste contexto, a nova legislação é particularmente rigorosa com os fornecedores no que diz respeito ao ressarcimento de danos provocados por um suprimento de má qualidade.

Atualmente constata-se um expressivo crescimento no número de reclamações por parte dos consumidores, devido principalmente a interrupção intempestiva do seu processo produtivo. Para a modernização dos processos fabris, na busca pela competitividade no mercado globalizado, muitos segmentos industriais estão utilizando equipamentos tecnologicamente mais avançados em suas linhas de produção. Estes equipamentos são, em sua maioria, constituídos por estruturas chaveadas a partir de dispositivos a estado sólido. O uso crescente dos mesmos é justificado porque os benefícios provenientes do seu uso são muito mais tangíveis do que os efeitos prejudiciais causados por eles, particularmente com respeito a geração de componentes harmônicas [02],[03].

Ao longo dos últimos dez anos, problemas relacionados com harmônicas de tensão e corrente tornaram-se mais evidentes, resultando principalmente em falhas ou mau funcionamento de equipamentos e sistemas de proteção e controle, aumento global das perdas elétricas e degradação de vida útil de equipamentos [04], [05], [06], [07], [08], [09].

Esta questão tem assumido uma importância estratégica para os consumidores e para as empresas de energia elétrica, uma vez que os custos associados ao tempo desde a interrupção do processo produtivo até a retomada da produção plena normalmente são muito elevados [03].

Várias técnicas têm sido utilizadas para a mitigação dos efeitos causados pelas harmônicas nas redes elétricas. Em fase de planejamento, normalmente são adotadas medidas

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

dessintonia, do nível de potência reativa a ser compensada e da alocação distribuída desta potência entre os diferentes braços, visando a maximização do desempenho do sistema de filtragem nas diferentes situações operacionais [43], [44], [45], [59], [52], [53]. Neste contexto, os resultados são animadores, entretanto algumas questões relacionadas principalmente com os procedimentos de otimização ainda necessitam de investigações complementares. Entre elas destacam-se a definição de critérios para a ponderação das variáveis a serem otimizadas e o estabelecimento de restrições e penalidades. Neste sentido, estudos complementares são necessários no sentido de se definir modelos adequados para a análise e compreensão dos fenômenos que envolvem a degradação do desempenho da filtragem. Para isto, é imprescindível desenvolver e implementar aplicativos computacionais derivados dos modelos propostos para análise de desempenho e estabelecimento de diretrizes para dimensionamento otimizado dos sistemas de filtragem passiva.

Apresenta-se neste trabalho estudos adicionais envolvendo a análise e o dimensionamento de filtros passivos ressonantes. Os estudos são inicialmente direcionados para a constatação do efeito residual das harmônicas minoritárias da tensão e da corrente sobre o desempenho do sistema de filtragem, utilizando-se modelos matemáticos e simulação computacional. Na seqüência, são apresentadas propostas para o dimensionamento adequado objetivando a maximização do desempenho operacional de um sistema de filtragem passiva.

O desenvolvimento do trabalho está organizado em cinco capítulos. O capítulo 1 apresenta conceitos e definições sobre harmônicas e filtros. As normas e resoluções consultadas são apresentadas no capítulo 2, sendo cada uma delas demonstrada de forma resumida, com ênfase dada apenas à norma IEEE 519-1992. O modelo matemático, bem como os índices de desempenho, são apresentados no capítulo 3. No capítulo 4 são abordados a implementação computacional e o estudo de casos, com a simulação dos resultados obtidos a partir de um aplicativo computacional desenvolvido neste trabalho, baseado na plataforma Microsoft Excel 2000®. As principais diretrizes para o dimensionamento otimizado do sistema de filtragem passiva são propostas e analisadas no capítulo 5. Os procedimentos de otimização são implementados a partir da rotina SOLVER, disponível no ambiente de programação Microsoft Excel 2000®.

Finalmente, na conclusão geral, encontram-se as contribuições obtidas com o trabalho e sugere-se a sua continuidade.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

A escolha de um dispositivo para supressão harmônica, melhor adaptado a condições operacionais particulares, não é apenas uma questão técnica, mas também econômica. Estudos comparativos são, portanto, cruciais para a escolha de tais dispositivos, embora geralmente não sejam sistematicamente avaliados [10].

O atual estágio de desenvolvimento tecnológico sinaliza uma forte tendência para a concepção de supressores harmônicos híbridos (SHH) que aglutinem as vantagens econômicas e operacionais das tecnologias ativa e passiva. Neste sentido, é imperativo que estudos adicionais sejam encaminhados no sentido de se estabelecer metodologias mais refinadas para o dimensionamento dos filtros passivos ressonantes, uma vez que estes serão partes integrantes dos SHH e deverão contribuir significativamente na busca de uma solução mais econômica [14], [15].

Muitos trabalhos envolvendo a aplicação de filtros passivos têm sido apresentados e tratam o assunto sob diferentes enfoques. Dentre os principais aspectos abordados destacam-se os estudos e proposições de diferentes topologias para o sistema de filtragem, bem como as respectivas metodologias de projeto [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17]. Um aspecto comum destes trabalhos é o procedimento adotado para a análise de desempenho e dimensionamento. As questões mais polêmicas estão relacionadas com a degradação da eficácia do sistema de filtragem devido as componentes harmônicas da carga não filtradas e as harmônicas presentes na tensão de alimentação. Neste contexto, discutem-se métodos para a minimização dos efeitos destas harmônicas singulares, bem como os procedimentos para implementá-los. Descartando os procedimentos que implicam em alterações topológicas, destacam-se três possibilidades para ajustes do desempenho da filtragem: a dessintonia dos ramos ressonantes, a sobre ou subcompensação reativa e a redistribuição da potência reativa de compensação entre os ramos. A principal questão abordada neste trabalho refere-se à definição dos critérios para dessintonização dos ramos, para fixação do nível adequado de compensação e sua divisão entre os diferentes ramos do sistema de filtragem. Apesar de persistirem algumas divergências com respeito aos critérios estabelecidos, a maioria dos trabalhos adota métodos baseados em tentativa e erro para a busca da solução mais adequada associados a simulações computacionais no domínio do tempo. Invariavelmente, esta metodologia requer um grande esforço computacional e um processo exaustivo de análise para diferentes condições operacionais do sistema de alimentação e da carga.

Em contrapartida, outros trabalhos têm tratado o assunto sob uma ótica mais sofisticada envolvendo procedimentos de otimização na busca de soluções para o ajuste da

operacionais, tais como a multiplicação do número de pulsos em instalações conversoras, a utilização de dispositivos de proteção microprocessados e de transformadores especiais com fator K, reconfiguração das redes elétricas, redimensionamento dos condutores neutros, entre outros [06].

Contudo, muitas vezes tais medidas, isoladamente ou em conjunto, podem ainda não ser suficientes para garantir o funcionamento seguro do sistema e/ou atender os limites estabelecidos pelas normas e recomendações técnicas. Nestes casos, torna-se necessária a instalação de equipamentos que visam a redução da distorção harmônica, os chamados supressores de harmônicas. Na literatura clássica sobre o assunto, é muito comum dividi-los em três grupos: filtros harmônicos passivos (FHP), filtros harmônicos ativos (FHA), e dispositivos híbridos construídos a partir de FHP e FHA [10], [11].

Os filtros harmônicos passivos proporcionam a redução de harmônicas através da modificação das propriedades de resposta em freqüência do sistema elétrico. Filtros harmônicos ressonantes (FHR) são os seus representantes mais comuns e este grupo também inclui filtros passa-faixa (FPF) e bloqueadores de harmônicas (BH) [12].

Os filtros harmônicos ativos são construídos a partir de semicondutores de potência e reduzem a distorção harmônica através da injeção de uma corrente (ou tensão) gerada pelo controle de chaveamento dos semicondutores visando a compensação da distorção da forma de onda original. A principal vantagem deste tipo de solução está no acompanhamento dinâmico das variações do sistema, reduzidas perdas e pequeno volume.

Os filtros passivos quando utilizados isoladamente são vistos, às vezes, como dispositivos ultrapassados, quando comparados aos filtros ativos. De fato, o desempenho dos filtros harmônicos ressonantes está fortemente ligado à característica da reatância da fonte de alimentação, e podem perturbar o comportamento do sistema elétrico e apresentar baixo grau de eficiência [12]. Por outro lado, os filtros ativos, com o progresso na tecnologia de semicondutores, terão, ao longo do tempo, seu grau de potência incrementado e seu custo reduzido. Entretanto, sua implementação enfrenta alguma resistência em aplicações atuais pelo fato de sua tecnologia ainda não ser totalmente dominada, o que limita sua aplicação a instalações de pequenas potências. Acredita-se, entretanto, que com a melhoria na segurança operacional, esta barreira certamente desaparecerá. Apesar disso, a aplicação de filtros passivos para supressão harmônica continua prevalecendo atualmente, mas, em um futuro próximo, é provável que filtros passivos e ativos coexistam nos sistemas de distribuição de energia elétrica [13], [14].

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

CAPÍTULO 1

Conceitos e Definições

1.1 – Introdução

A distorção harmônica nos sistemas de potência e nas instalações industriais tem se mostrado preocupante. O incremento na aplicação de equipamentos de eletrônica de potência tem resultado na geração de componentes harmônicos de corrente, que, combinados com as características do sistema elétrico, determinam o grau de distorção da tensão. Os problemas resultantes das distorções harmônicas incluem: sobreaquecimento e falhas nos enrolamentos dos motores, rompimento dos fusíveis de proteção dos bancos de capacitores, excessivo valor da corrente de neutro dentro das instalações e comprometimento dos sistemas de medições [18].

1.2 – Harmônicas

A metodologia de análise de sinais periódicos não-senoidais, no domínio da freqüência, originou-se a partir de um trabalho apresentado pelo matemático francês Jean Babtiste Joseph Fourier (1768-1830), em 1822. O teorema formulado por Fourier estabelece que qualquer função contínua e periódica em um intervalo T, F(t), pode ser representada pela composição de uma parcela constante, uma parcela senoidal de mesma freqüência do sinal original denominada fundamental e um somatório de parcelas senoidais com freqüências múltiplas da fundamental, denominadas harmônicas, conforme estabelecido na equação 1.1 e ilustrado na figura 1.1 [04], [11], [18].

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

$$F(t) = F_o + F_1 \text{sen}(\omega t + \varphi_1) + \sum_{h=2}^{\infty} [F_h . \text{sen}(h\omega t + \varphi_h)] \quad (1.1)$$

Sendo: F_o - componente constante;

F_1, φ_1 - amplitude e ângulo de fase da componente fundamental;

F_h, φ_h - amplitude e ângulo de fase da h-ésima componente harmônica.

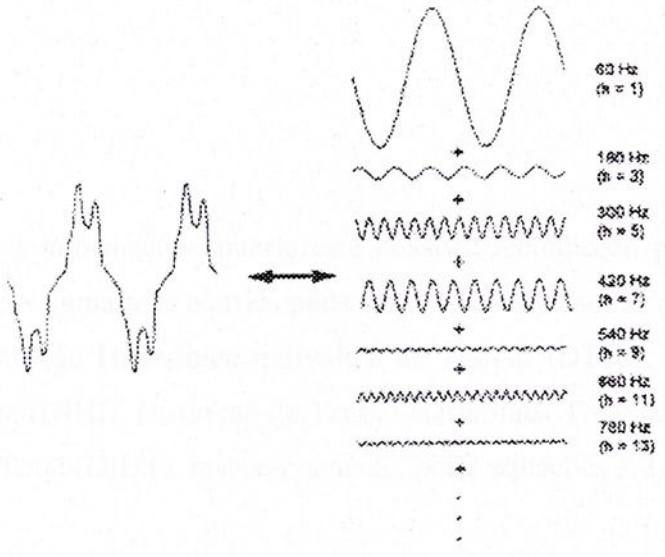


Figura 1.1 – Representação da Série de Fourier para uma forma de onda distorcida.

1.2.1 - Definições Aplicáveis

A caracterização da presença de harmônicas pode ser feita através do tratamento individual ou total das mesmas. Nestas circunstâncias surgem as seguintes definições:

Distorção harmônica individual: dada pela relação entre a amplitude da tensão harmônica de ordem h (V_h) e a correspondente tensão fundamental (V_1). No tocante a esta última, podem ser encontradas três definições. A primeira corresponde a atribuir à V_1 o valor real de operação obtido no instante da medição, a segunda consiste em utilizar a tensão nominal do barramento considerado e, finalmente, a terceira utiliza um valor de referência constante e definido pelo usuário. De forma análoga, os conceitos podem ser estendidos para as correntes. Entretanto, quanto ao valor a ser definido como corrente fundamental, este deverá ser igual ao nominal para o ponto de medição ou, alternativamente, adotado como a

corrente de carga para a demanda máxima. Estas opções visam contornar os problemas oriundos quando baixos carregamentos são impostos aos pontos de medição [18].

Distorção harmônica total: esta definição tem por meta gerar uma variável representativa da ação conjunta de todas as freqüências harmônicas presentes nos sinais de tensão ou corrente. Desta forma, a mesma é expressa por uma composição quadrática das distorções individuais, fato este que resulta numa distorção resultante eficaz [18].

1.2.2 – Formulações

A partir das informações anteriores é possível reconhecer que a quantificação da presença de harmônicos numa rede elétrica pode ser feita como a seguir.

Define-se Distorção Harmônica Individual de Tensão (DTHI), Distorção Harmônica Individual de Corrente (DIHI), Distorção de Tensão Harmônica Total (DTHT) e Distorção de Corrente Harmônica Total (DIHT), respectivamente, pelas equações 1.2, 1.3, 1.4 e 1.5, [18].

$$\text{DTHI} = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \tag{1.2}$$

$$\text{DIHI} = \frac{I_h}{I_1} \times 100 \tag{1.3}$$

$$\text{DTHT} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{máx}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \tag{1.4}$$

$$\text{DIHT} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{máx}} I_h^2}}{I_1} \times 100 \tag{1.5}$$

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

Nas definições anteriores tem-se:

V_h – Tensão harmônica individual de ordem h, Volt ou pu;
I_h – Corrente harmônica individual de ordem h, Ampère ou pu;
h – Ordem harmônica considerada;
$h_{máx}$ – Máxima ordem harmônica considerada;
V_1 – Tensão fundamental, Volt ou pu;
I_1 – Corrente fundamental, Ampère ou pu.

1.3 – Supressores de Harmônicas

Com vistas à mitigação das distorções harmônicas, sempre que possível são adotadas medidas operacionais normalmente relacionadas com a adequação das cargas geradoras de harmônicas individualmente como, por exemplo, a multiplicação do número de pulsos em instalações conversoras, bem como com a alteração da topologia das redes elétricas.

Ocorre, no entanto, que na maioria das vezes tais medidas são insuficientes para garantir o funcionamento adequado do sistema e/ou atender os limites estabelecidos pelas normas e recomendações técnicas. Nestes casos, torna-se indispensável o uso de equipamentos especiais para atenuação da distorção harmônica, chamados supressores de harmônicas. Existem várias propostas para configuração de supressores harmônicos, que podem ser agrupadas inicialmente em dois grandes grupos: supressores harmônicos passivos, conhecidos também como filtros passivos e condicionadores de energia, popularmente conhecidos como filtros ativos [10]. A seguir apresenta-se uma abordagem simplificada das diferentes tecnologias existentes com destaque para o filtro harmônico ressonante (FHR) que é o foco deste trabalho.

1.3.1 – Supressores Harmônicos Passivos

A estrutura típica de um sistema de filtragem de corrente baseada na tecnologia passiva é mostrada na figura 1.2. As várias células ressonantes são sintonizadas nas freqüências que se deseja eliminar, o que, via de regra, são as harmônicas de baixas ordens, que normalmente se manifestam com amplitudes mais elevadas. Para as freqüências superiores, quando presentes, é utilizado, em geral, um simples capacitor [12].

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

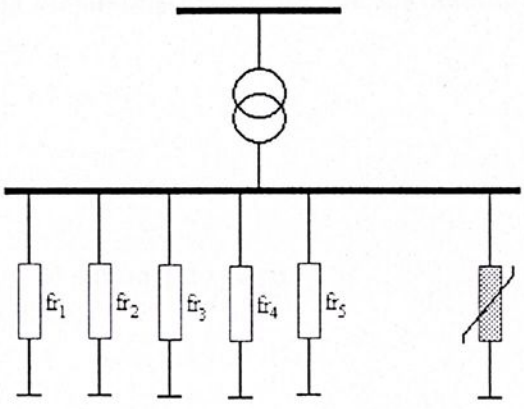


Figura 1.2 – Sistema de filtragem harmônica passiva.

Cada célula constitui um filtro harmônico ressonante (FHR) e é uma estrutura composta basicamente pela associação série de indutores e capacitores conforme ilustrado na figura 1.3, [12]. Este dispositivo, quando colocado em paralelo na instalação, apresenta uma impedância muito baixa para sua freqüência de ressonância, atuando praticamente como curto-circuito para a harmônica em questão.

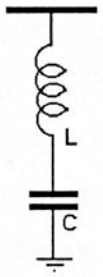


Figura 1.3 - Circuito LC.

Baseado no circuito simplificado, obtém-se a impedância equivalente do filtro, conforme equação 1.6.

$$Z_f = 2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC} \tag{1.6}$$

Na freqüência de ressonância a impedância é nula, então:

$$2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C} \tag{1.7}$$

A freqüência de ressonância ou sintonia do filtro pode ser determinada pela expressão 1.8, derivada das equações 1.6 e 1.7.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{1.8}$$

Sendo: f_r . freqüência ressonante ou de sintonia do filtro.
L - indutância do reator do filtro;
C – capacitância do filtro.

Nestas condições, define-se ordem harmônica ressonante, como:

$$h_r = \frac{f_r}{f_1} \tag{1.9}$$

Sendo: f_1: freqüência fundamental (freqüência da rede).

Observa-se que na ressonância existe uma resistência no caminho da corrente, a qual está associada principalmente às características elétricas dos fios dos indutores. Isto faz com que a compensação não seja ideal e, mais do que isso, que exista uma componente distorcida também na tensão do barramento de instalação do filtro [10], [12].

Em função dos parâmetros R, L e C, o filtro ressonante apresenta algumas características importantes. Sob o ponto de vista da resposta em freqüência, ele apresenta um comportamento capacitivo para as freqüências abaixo da sua freqüência de sintonia. Supondo que a carga alimentada seja de natureza indutiva, então o filtro pode contribuir para a compensação da potência reativa na freqüência da rede, corrigindo o fator de deslocamento [12].

A relação entre os parâmetros L e C é um fator determinante no estudo do comportamento do filtro em regime transitório, particularmente com respeito a sua energização. Neste sentido, define-se sua impedância característica conforme equação 1.10.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{1.10}$$

O fator de qualidade é um parâmetro adimensional, definido tanto para circuitos como para componentes, através da relação entre a máxima energia armazenada e a energia total dissipada por período. Tal parâmetro, em geral, é expresso pelo símbolo $\overline{Q}$.

$$\overline{Q} = \frac{2\pi . f_r L}{r} \tag{1.11}$$

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

Sendo: $\overline{Q}$ - fator de qualidade do reator do filtro;
r - resistência elétrica do reator.

O fator de qualidade dos filtros sintonizados é uma medida do grau de seletividade desses circuitos, quanto às freqüências harmônicas. Quanto maior for o fator $\overline{Q}$ mais seletivo será o filtro, ou seja, ele impedirá cada vez mais a absorção das correntes harmônicas de freqüências diferentes daquelas de sintonia [19]. Os valores típicos dos fatores de qualidade de filtros sintonizados situam-se na faixa de 30 a 60. A figura 1.4 ilustra a variação da impedância do filtro com a freqüência, para três diferentes fatores de qualidade.

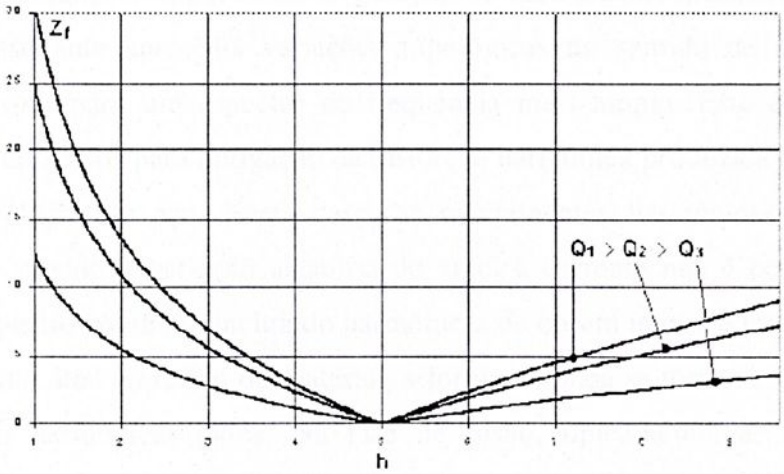


Figura 1.4 - Variação da impedância com a freqüência.

A resistência elétrica do reator (r) é definida na freqüência f_r e depende do efeito pelicular. Ela também representa a impedância quando o paralelo ressonante é sintonizado e é a responsável pelas perdas no filtro.

Na prática, o desempenho de filtros paralelos ressonantes é reduzido por dessintonia, e são necessárias soluções especiais, como o compromisso adequado entre o fator $\overline{Q}$ e o desempenho do filtro, para reduzir a sensibilidade à dessintonia e, assim, aceitar flutuações da freqüência de sintonia f_r, causadas pela variação da capacitância com a temperatura dos capacitores [12], [19].

Podem ser usadas, simultaneamente, várias montagens sintonizadas em diferentes freqüências, de modo a remover ou atenuar várias ordens harmônicas. Em princípio, pode ser instalado um filtro ressonante para cada harmônica a ser eliminada, formando um sistema de filtragem. Esse procedimento aparentemente simples requer um estudo detalhado para sua instalação, uma vez que, embora o filtro atue praticamente como um "curto-circuito" para a

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

freqüência de sintonia, existe o risco de ocorrer ressonâncias com as outras indutâncias da rede elétrica, em outras freqüências, ou mesmo ressonância paralela entre as diferentes seções de filtros. Desta forma, outras ordens harmônicas poderão ser amplificadas causando perturbações não observadas antes da instalação do sistema de filtragem [10].

1.3.1.1 – Filtros Harmônicos Amortecidos

Para algumas condições específicas de geração de harmônicas, a estrutura básica do filtro harmônico ressonante apresenta variações topológicas no sentido de assegurar um desempenho satisfatório para um espectro de freqüência mais amplo. Este é o caso, por exemplo, dos filtros utilizados para mitigação da distorção harmônica produzida por fornos de arco, usados na produção de aço. Neste caso, as componentes harmônicas geradas são imprevisíveis, pois, devido à variação aleatória do arco, a corrente não é periódica e sua análise revela um espectro contínuo, incluindo harmônicas de ordem inteira e fracionária [12].

Quando o forno atua no refino do material, a forma de onda se torna simétrica, com o desaparecimento das harmônicas pares. Na fase de fusão, tipicamente, as componentes harmônicas apresentam amplitude de até 8% da fundamental, enquanto no refino, valores típicos são em torno de 2% [11], [19]. Os filtros ressonantes precisam ser amortecidos, pois o espectro contínuo do forno aumenta a probabilidade de injeção de uma corrente com freqüência igual à de ressonância paralela entre os elementos de filtragem, o que se observa pelo fato da impedância crescer. Caso existam componentes harmônicas nestas freqüências elas produzirão um ganho em tensão, sendo amplificadas.

Além disso, quando é necessária a atenuação de várias ordens harmônicas, a instalação de um grande número de filtros paralelos ressonantes é, em geral, dispendiosa e, por isso, é mais econômico o uso de filtros amortecidos. Entre as principais características dos filtros amortecidos destacam-se: o amortecimento anti-ressonante, tensões harmônicas reduzidas para freqüências maiores ou iguais à sua freqüência de sintonia e o amortecimento rápido dos transitórios produzidos durante sua energização [19].

Embora se reconheça a importância dos filtros amortecidos para a mitigação do conteúdo harmônico nos sistemas de energia elétrica, estes arranjos de filtros passivos não são analisados no contexto deste trabalho.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

1.3.2 – Supressores Harmônicos Ativos

Os filtros harmônicos ativos, também conhecidos como condicionadores de energia, reduzem a distorção total monitorando as harmônicas da corrente elétrica absorvidas pela carga e, a seguir, gerando-as e injetando-as nas linhas de alimentação com o sinal oposto.

As correntes de compensação geradas pelos filtros ativos são moldadas por chaveamentos rápidos dos transistores de potência de um inversor com modulação por largura de pulso (PWM). A tensão CC necessária para a operação do inversor PWM, é provida por um dispositivo de armazenamento de energia, usualmente um capacitor, que é sistematicamente recarregado através do próprio sistema de suprimento [16], conforme figura 1.5. Observa-se então que, ainda que os filtros ativos contenham dispositivos de armazenamento de energia, eles não transferem energia para o sistema elétrico e, conseqüentemente, trata-se realmente de dispositivos passivos, e não ativos [10]. Por outro lado, as correntes harmônicas não são reduzidas no processo de filtragem, mas sim por compensação, sendo, portanto, mais conveniente classificá-los como compensadores. Embora se reconheça a importância dessa classificação proposta sob uma ótica mais rigorosa e abrangente de análise de sistemas de supressão de harmônicas, a abordagem realizada neste trabalho não requer tal precisão e tais dispositivos são referenciados apenas como filtros ativos.

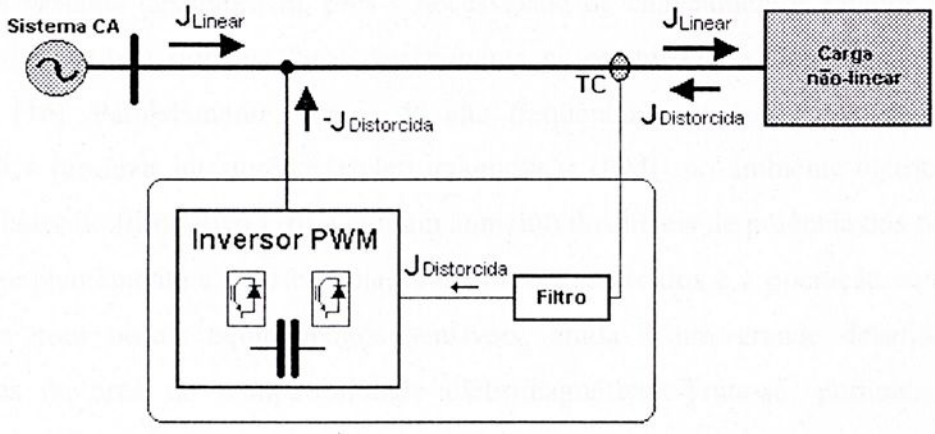


Figura 1.5: Diagrama esquemático de um filtro ativo.

Os filtros harmônicos ativos têm inúmeras vantagens sobre os filtros passivos. Possuem, em geral, características operacionais que permitem não só reduzir o conteúdo harmônico, mas também incorporar funções de controle adicionais para compensação da energia reativa e desbalanceamento de correntes. Ao contrário dos FHR's, eles não reduzem

apenas as harmônicas de correntes selecionadas, mas atenuam todo o espectro presente, inclusive as componentes não-periódicas. Ao mesmo tempo, eles não provocam ressonâncias nocivas ao sistema de distribuição e, consequentemente, não causam amplificação de harmônicas. O desempenho global do filtro ativo é também praticamente independente das características operacionais do sistema de suprimento sendo, portanto, imune às alterações no carregamento e/ou reconfiguração. Finalmente, destaca-se também que, pela sua natureza operacional, os filtros ativos são inerentemente dispositivos adaptativos, enquanto que os filtros passivos são dispositivos de parâmetros fixos. Para tornarem-se adaptativos, requerem investimentos adicionais para incorporação de alternativas tecnológicas muitas vezes de difícil implementação.

Devido a todas essas características, futuramente os filtros ativos serão os substitutos naturais dos filtros passivos em várias aplicações, a exemplo do que vem acontecendo com relação à utilização de instrumentação e medição digitais em substituição às tecnologias eminentemente analógicas. Acredita-se, portanto, que ambos coexistirão por um longo tempo nos sistemas de energia elétrica [13].

Os filtro ativos, mesmo apresentando uma tecnologia bastante promissora, naturalmente apresentam algumas desvantagens quando comparados com as demais técnicas de supressão de harmônicas. Muitas delas são inerentes à tecnologia digital, enquanto outras são relacionadas com o estado da arte das técnicas de chaveamento. Atualmente, esta é uma característica bastante desfavorável, pois a necessidade de chaveamentos rápidos para altos valores de corrente tem sido um fator determinante na estabilização tecnológica dos filtros ativos [13], [16]. Paralelamente, ruídos de alta freqüência associados aos chaveamentos podem surgir e produzir interferências eletromagnéticas (EMI) no ambiente elétrico situado nas proximidades do filtro ativo [16]. Com um aumento dos níveis de potência dos filtros, este ruído e, conseqüentemente a interferência, também são acrescidos e a operação conjunta dos filtros ativos com outros equipamentos sensíveis, ainda é um grande desafio para os pesquisadores da área de compatibilidade eletromagnética. Trata-se, portanto, de uma tecnologia relativamente nova com várias pesquisas em andamento, e por esta razão muitas vezes os filtros ativos ainda são concebidos apenas como protótipos. Por outro lado, outras características dos filtros ativos, consideradas desvantagens no momento, como o seu custo, limites de potência e complexidade operacional certamente desaparecerão com o progresso tecnológico e com a produção em larga escala [13].

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

1.3.3 – Supressores Harmônicos Híbridos

Um FHR cria um caminho de baixa impedância não apenas para as harmônicas geradas pelas fontes harmônicas geradas pelas cargas não-lineares, mas também para as originadas no sistema de distribuição, que incrementam os valores totais das componentes harmônicas drenadas pelo filtro. Além disso, devido à ressonância do filtro com a reatância do sistema de distribuição, a eficiência de tais filtros é fortemente afetada por reconfigurações no sistema elétrico de suprimento, assim como pelo espectro harmônico adicional da corrente e tensão fora das freqüências de sintonia. Estas características negativas dos FHR contribuem para que os filtros ativos se tornem cada vez mais atrativos na medida em que o seu desenvolvimento tecnológico se consolida [17].

Por outro lado, os FHR's apresentam importantes vantagens sobre os filtros ativos. São equipamentos relativamente simples, construídos a partir de componentes com uma boa estabilidade tecnológica, baixo custo e segurança. Os FHR's são insensíveis a distúrbios e interferência eletromagnéticas, não apresentam limitações quanto a categorias de potência e não têm exigências especiais de manutenção. Num sistema de distribuição com distorção de tensão muito pequena e com correntes harmônicas intensas como, por exemplo, retificadores de alta potência, o FHR é um supressor de harmônicas muito eficaz, barato e seguro [15].

Diante das vantagens e desvantagens inerentes às tecnologias ativa e passiva, surge uma nova vertente no sentido de combinar as características mais atrativas das duas tecnologias, concebendo-se os chamados dispositivos de supressão harmônica híbridos, ou simplesmente filtros híbridos [14].

Como se sabe, a corrente de carga contém componentes prejudiciais de naturezas físicas diferentes, entre eles, ordens harmônicas características e o fator de deslocamento. A compensação destas componentes específicas muitas vezes não requer um filtro ativo, mas apenas um arranjo de filtros passivos. Assim, se algumas componentes dominantes da distorção harmônica, bem como o fator de deslocamento, forem compensados através de filtros harmônicos ressonantes convencionais (FHR's), o restante pode ser compensado por um filtro ativo composto por um inversor PWM de baixa potência, conforme ilustrado na figura 1.6. Desta forma é possível adequar a potência a ser processada pelo filtro ativo para níveis seguros e compatíveis com o estágio de desenvolvimento das chaves dos inversores PWM, ao mesmo tempo, reduzindo os ruídos de comutação, a interferência eletromagnética e, sobretudo, o custo global de instalação [15].

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

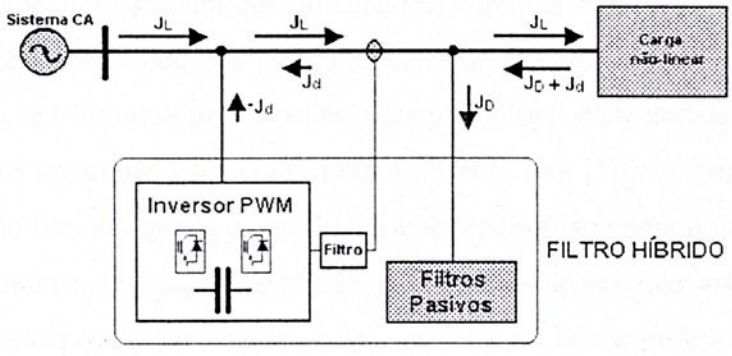


Figura 1.6: Diagrama esquemático de um filtro híbrido.

1.3.4 – Aperfeiçoamento dos Filtros Harmônicos Ressonantes

Baseado nas constatações apresentadas no item 1.3.3 acredita-se que a concepção de sistemas de supressão harmônica híbrida (SHH), que incorporam as principais vantagens econômicas e operacionais das tecnologias ativa e passiva seja uma tendência bastante promissora para futuros projetos. Visando, pois, atender a esta expectativa, é necessário que sejam efetuados novos estudos no sentido de se estabelecer metodologias mais refinadas para o aperfeiçoamento dos critérios de projeto dos filtros passivos ressonantes, uma vez que estes serão partes integrantes dos SHH e deverão contribuir significativamente na busca de soluções tecnicamente viáveis e economicamente atrativas.

Para o projeto dos FHR's, o sistema no qual ele será instalado deverá ser investigado detalhadamente, com respeito à sua impedância interna e espectros harmônicos de tensão de alimentação e da corrente da carga não-linear. Estes são dados imprescindíveis para orientação do projeto e avaliação do desempenho do filtro.

A eficiência dos FHR's na supressão harmônica pode ser aumentada apenas com uma pequena modificação na estrutura do arranjo básico ou através de alterações substanciais na sua topologia [10]. Em alguns casos é suficiente adicionar seções passa-banda à estrutura do FHR padrão para aperfeiçoar suas características de freqüência. Esta metodologia encontra-se bem sedimentada, entretanto não pode ser considerada uma solução genérica.

Em condições onde mesmo um FHR combinado não é suficientemente eficaz, a escolha de um outro arranjo pode ser uma solução satisfatória. Visando reduzir o efeito de alterações na reatância do sistema de distribuição no desempenho do filtro pode ser adicionado um indutor linear L_o [10]. Este indutor possibilita que no projeto de um filtro, as ressonâncias

nocivas, denominadas pólos, sejam direcionadas para freqüências fixas. Nestas condições os pólos do filtro podem ser deslocados para uma faixa de freqüência tão longe quanto possível das freqüências das harmônicas presentes no sistema elétrico e/ou geradas pelas cargas não-lineares. Tais filtros são conhecidos como FHR's de pólo fixo [10]. A principal desvantagem de RHF's com pólo fixo é a queda de tensão na freqüência fundamental devido ao indutor de linha, comprometendo a regulação de tensão na carga, uma vez que esta é dependente da indutância do sistema de alimentação e da indutância linear inserida. Entretanto, um acréscimo na eficácia da supressão harmônica pode ser, em alguns casos, mais importante que a degradação da regulação da tensão. Por outro lado, este efeito pode ser reduzido substituindo-se o indutor linear por um filtro LC série, sintonizado na freqüência da harmônica fundamental. Este arranjo proporciona o aumento da reatância de linha para harmônicas de ordens elevadas para um mesmo grau previsto anteriormente, e, ao mesmo tempo, reduz a queda de tensão à freqüência fundamental [10].

Os filtros harmônicos ressonantes são usualmente considerados dispositivos com propriedades fixas. Contudo, desenvolvimentos recentes em processamento de sinais e na eletrônica de potência podem convertê-los em dispositivos adaptativos. Utilizando-se chaves estáticas baseadas em semicondutores de potência é possível promover alterações topológicas em tempo real, visando a manutenção da eficácia do filtro frente às alterações do sistema de suprimento. Contudo, isso converte um FHR em um dispositivo intrinsecamente híbrido, mas com um diferente significado do explanado no item 1.3.3. Esta metodologia ainda não é totalmente dominada, e vários estudos têm sido encaminhados para estabelecer critérios e procedimentos para solidificar as técnicas de projeto, bem como sua implementação.

Ainda neste contexto, outros procedimentos podem ser implementados no sentido de garantir a eficácia dos FHR's, praticamente sem nenhuma alteração no arranjo básico. Uma vez definidas as freqüências predominantes a serem filtradas, bem como a potência reativa a ser compensada, buscam-se soluções mais refinadas através de dessintonia dos diferentes braços do sistema de filtragem, sobre ou subcompensação de reativos e redistribuição da potência reativa alocada por braço [10].

1.4 - Conclusões

Os benefícios econômicos do uso de equipamentos eletrônicos de potência são muito mais visíveis do que os efeitos nocivos causados pelas harmônicas geradas durante sua

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

operação. Este fato tem contribuído decisivamente para o aumento de cargas não-lineares nos sistemas de energia elétrica e, conseqüentemente, das distorções harmônicas. De um modo geral, observa-se que a tecnologia disponível é muito mais eficaz na geração de harmônicas do que na sua eliminação através de sistemas de filtragem. Considerando-se, pois, o crescimento ostensivo destas cargas não-lineares, este entrave tecnológico necessita ser revertido. Desta forma, a busca de métodos eficazes de supressão harmônica, bem como o desenvolvimento de novos equipamentos, são absolutamente necessários.

Atualmente, as contribuições mais promissoras estão relacionadas com os sistemas de filtragem baseados em tecnologias ativas. Contudo, ainda persistem barreiras tecnológicas ligadas às limitações de potência processada através de chaveamento eletrônico. Por outro lado, o baixo nível de potência processada e o alto custo de implantação dos filtros ativos, podem ser contornados com a adoção do chamado supressor harmônico híbrido. Este é construído a partir da composição de um filtro ativo com um arranjo passivo do tipo filtro harmônico ressonante (FHR), aglutinando os principais benefícios das diferentes tecnologias.

Conclui-se que, a médio prazo, filtros ativos e passivos deverão coexistir nas redes elétricas, e que muitos sistemas de filtragem deverão evoluir para arranjos híbridos. Desta forma, o conhecimento detalhado das tecnologias empregadas, bem como das técnicas para avaliação de desempenho, são indispensáveis para definir, dentro de critérios técnicos e econômicos, o grau de contribuição de cada vertente tecnológica na concepção destes projetos de filtragem harmônica. Neste sentido, este trabalho apresenta nos próximos capítulos o estudo e a implementação de uma metodologia para avaliação de desempenho de FHR's.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

CAPÍTULO 2

Normas e Recomendações

2.1 – Introdução

Há alguns anos, houve uma explosão de novas idéias e uma adequação dos novos conceitos oriundos da operação dos sistemas de energias elétrica com cargas elétricas não-lineares geradoras de harmônicas. Várias ocorrências, relatando falhas na operação relacionadas principalmente com interrupções no fornecimento de energia, degradação acentuada da vida útil dos equipamentos, sobretensões e sobrecorrentes, têm sido registradas com freqüência. Neste novo ambiente operacional, várias recomendações e normas têm sido propostas no sentido de garantir condições adequadas de suprimento por partes das concessionárias bem como limites de injeção harmônica por parte dos consumidores [20].

2.2 – Histórico da Legislação Internacional

Como marco inicial para as considerações a serem feitas sobre as normas e recomendações que regem o controle da qualidade da energia elétrica e particularmente no que se refere às distorções harmônicas, vale observar que os primeiros documentos são provenientes da Europa e dos Estados Unidos.

No contexto europeu, em 1969, o CENELEC (*European Commitee for Electrotechnical Standardization*) e o IEC (*International Electrotechnical Commission*) formaram comitês para investigar os efeitos dos harmônicos causados por circuitos eletrônicos usados em equipamentos domésticos. Esta última instituição constitui-se numa organização mundial de normatização, cujo objetivo é promover a cooperação internacional em todas questões relativas às normas, recomendações e orientações. Assim, surgiu a primeira

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

norma (EN50006), aprovada pelo CENELEC em 1975, sendo adotada por 14 países europeus. Posteriormente, em 1982, os alemães lideraram um movimento para a substituição desta pelo documento IEC-555, que é uma norma de maior abrangência. Em dezembro de 1991, o CENELEC, fundamentado na IEC-555-2, aprovou um documento que dá as diretrizes para os padrões de qualidade nos países europeus. Este último documento recebeu a sigla EN605552-2. Em 1993 foi iniciado pelo CENELEC um processo de revisão, que culminou, em 1994, na norma européia EN50160. Esta norma fornece as principais características da tensão nos terminais de suprimento do consumidor, nos níveis de distribuição de baixa e média tensão [22].

Paralelamente aos trabalhos que culminaram na norma européia EN50160, a IEC ainda continua atuando e publicando documentos para uso internacional, na forma de normas, relatórios técnicos e manuais. Neste sentido, encontram-se disponíveis atualmente as recomendações denominadas por IEC 1000-2-2 (1990), 1000-3-2 (1995), 1000-3-6 (1996) e 1000-4-7 (1991), que são uma extensão da IEC-555-2 e fornecem diretrizes para as metodologias e procedimentos para diferentes regulamentações que normatizam questões vinculadas com a qualidade da energia elétrica. Estas recomendações, nos dias atuais, receberam novas designações, fato este que gerou a série IEC 60000. Estas últimas contemplam, em sua essência, as mesmas diretrizes da série IEC 1000. Isto posto, fica o reconhecimento público que os documentos IEC constituem-se muito mais em diretrizes gerais a serem observadas do que documentos regulamentadores propriamente ditos [30].

Em 1973, nos Estados Unidos, o IEEE-IAS (*Institute of Electrical and Electronics Engineers - Industry Application Society*) iniciou um projeto de desenvolvimento de normas sobre harmônicos e divulgou, em 1981, a primeira recomendação, a qual recebeu a designação de IEEE 519. O IEEE possui uma hierarquia de documentos, desde os de caráter instrutivos até os mais regulamentadores, constituídos de "Manuais", "Práticas Recomendadas" e "Normas". Em 1986, os engenheiros de potência (*Power Engineering Society*) se uniram aos engenheiros da indústria (IAS) para atualizar o "Manual" IEEE 519 para a categoria de "Práticas Recomendadas", onde o escopo e conteúdo foram consideravelmente ampliados. Em Junho de 1992, a IEEE 519 *Recommended Practice* foi aprovada para prover um documento sobre as causas, efeitos, medições e controle de harmônicos em sistemas de potência [21]. A IEEE Standard 519-1992, *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, constitui-se de procedimentos para o controle de harmônicos em sistemas de potência, juntamente com os limites recomendados para injeções de correntes harmônicas. Esta recomendação prática é

usada para orientar projetos de sistemas elétricos, com destaque ao suprimento de cargas não-lineares. Além disso, são também apresentados limites para a definição da adequabilidade operacional de instalações, ressaltando-se o seu funcionamento em regime permanente [22].

A partir das orientações definidas nos documentos supramencionados, com pequenas particularidades próprias a cada situação, surgiram recomendações e normas específicas para diferentes países. Esta é a realidade dos documentos: Norma Alemã (DIN EN 50160), Norma Sul-Africana (NRS-048), Norma Peruana (NTCSE), Recomendação GCOI (Grupo Coordenador para Operação Interligada) e GCPS (Grupo Coordenador de Planejamento dos Sistemas Elétricos), etc.

2.3 – Histórico da Legislação Nacional

Há cerca de três décadas atrás, as reclamações envolvendo a qualidade do fornecimento de energia elétrica estavam basicamente associadas às interrupções na tensão de alimentação dos consumidores. Para regulamentar as condições técnicas e a qualidade do serviço de energia elétrica, o DNAEE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica) lançou as Portarias Nº 046 e 047, de 17 de abril de 1978 e a Portaria Nº 031, de 11 de abril de 1980, considerando ser imprescindível a conceituação de serviço adequado de energia elétrica, o estabelecimento de método uniforme para apuração dos índices de continuidade de suprimento dos sistemas elétricos, e a definição dos limites de variação das tensões a serem observados pelas empresas de energia elétrica.

A partir de 1978, a ELETROBRÁS liderou um processo de discussão sobre critérios e metodologias para o atendimento de consumidores com cargas especiais. Em 1984, houve uma revisão destes critérios e metodologias, com o objetivo de acrescentar a experiência operacional obtida pelas empresas de energia elétrica. As propostas de critérios, procedimentos técnicos e limites recomendados nos relatórios emitidos, foram direcionados essencialmente para o controle dos distúrbios de natureza quase-permanente, particularmente a distorção harmônica. Em 1993, a ELETROBRÁS fez uma nova revisão dos documentos anteriores, levando em conta a experiência dos grupos de trabalho do CIGRÉ (Conseil International Des Grands Réseaux Electriques), IEC e IEEE, bem como as novas experiências das empresas brasileiras. Entidades representativas dos grandes consumidores de energia elétrica, tais como o IBS (Instituto Brasileiro de Siderurgia) e a ABRACE (Associação

Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia), também participaram dos debates. Finalmente, em fevereiro de 1993 foi emitido o documento "Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais", cuja autoria foi atribuída ao GCOI e ao GCPS. Este documento estabelece critérios e procedimentos de planejamento e de operação para a avaliação e o controle das perturbações causadas por cargas não-lineares, intermitentes ou desequilibradas, genericamente denominadas por cargas especiais [28]. Em novembro de 1997, este documento foi complementado por outro, denominado "Procedimentos de Medição para Aferição da Qualidade da Onda de Tensão Quanto ao Aspecto de Conformidade (Distorção Harmônica, Flutuação e Desequilíbrio de Tensão)" [29].

2.4 – Recomendações e normas consultadas

Apresentam-se a seguir os aspectos mais relevantes associados às diferentes normas, regulamentações e recomendações sobre harmônicas vigentes em diferentes países. Finalmente, serão apresentados padrões e regras estabelecidas pela ONS (Operador Nacional do Sistema) relativo a distorções harmônicas.

2.4.1 - Recomendação IEEE

A recomendação IEEE 519 constitui-se numa das mais conceituadas e referenciadas fontes sobre a matéria. Devido a este fato, ela será tratada com maior detalhamento neste trabalho. Os conceitos apresentados envolvem a avaliação de limites harmônicos de corrente para consumidores individuais e de tensão para todo o sistema. Estes limites são tipicamente avaliados no ponto de acoplamento comum (PAC) entre a concessionária e o consumidor [22].

2.4.1.1 - Harmônicas de Tensão

A responsabilidade de manter a qualidade da tensão em todo o sistema fica atribuída à concessionária. A tabela 2.1 resume os limites de distorção de tensão estabelecidos para diferentes níveis de tensão.

Tabela 2.1- Limites de distorção harmônica de tensão em % da nominal.

Tensão nominal do PAC (V_n)	Distorção Harmônica de Tensão Individual (%)	Distorção Harmônica de Tensão Total – DTHT (%)
$V_n \leq 69kV$	3.0	5.0
$69kV < V_n \leq 161kV$	1.5	2.5
$V_n > 161kV$	1.0	1.5

Obs: Tais limites devem ser usados para operação normal, ou seja, durante condições que durem mais de uma hora. Para períodos menores, durante partidas ou condições não-usuais, esses limites podem ser excedidos em 50%.

Um ponto a ser ressaltado é que esta definição é levemente diferente daquela convencional, que expressa a distorção em relação à magnitude da tensão fundamental no instante da medição. Neste caso, a avaliação da distorção de tensão é feita com relação a valores fixos (tensão nominal) ao invés daqueles que variam com a tensão do sistema (tensão fundamental).

2.4.1.2 - Harmônicas de Corrente

A distorção harmônica de tensão no sistema é uma função da corrente harmônica total injetada e da impedância do sistema, em cada uma das freqüências presentes. A corrente total injetada, por sua vez, dependerá do número de consumidores individuais geradores de correntes harmônicas, bem como do porte de cada unidade. Diante disso, uma estratégia razoável para limitar as correntes harmônicas dos consumidores individuais é buscar mecanismos para que tais limites dependam, sobretudo, do porte dos mesmos.

Os objetivos dos limites de corrente são restringir a máxima tensão harmônica individual em 3% da fundamental e a distorção harmônica total (DTHT) em 5% na mesma base. Entretanto, devido à diversidade encontrada nas correntes harmônicas injetadas pelos vários consumidores (diferenças nas componentes harmônicas, ângulos de fase e no perfil das injeções durante o tempo), os limites para as distorções de corrente são propostos de modo que a máxima distorção de tensão causada por um único consumidor não exceda os valores da tabela 2.2. Vale observar que tais níveis estão intimamente atrelados à impedância de curto-circuito do barramento sob enfoque. Desta forma, a tabela 2.2 apresenta os diferentes limites de distorção de tensão resultantes de injeções de correntes harmônicas individuais e

integradas (vários consumidores), conforme o nível de curto-circuito. Os níveis de distorção apresentados na segunda coluna referem-se às contribuições individuais de cada consumidor.

Tabela 2.2 - Base para determinação dos limites de distorção harmônica de corrente.

*Scc no PAC	Máxima Distorção Harmônica de Tensão Individual (%)	Considerações Relacionadas
10	2.5 - 3.0	Sistema Dedicado
20	2.0 - 2.5	1-2 grandes consumidores
50	1.0 - 1.5	Poucos consumidores relativamente grandes
100	0.5 - 1.0	5-20 consumidores médios
1000	0.05 - 0.1	Muitos consumidores pequenos
* Scc – Relação entre a corrente de curto-circuito e a corrente de carga na demanda máxima.		

As correntes harmônicas provenientes dos consumidores individuais são avaliadas nos seus pontos de acoplamento comum (PAC) com a concessionária. Tais limites dependem da carga do consumidor em relação à potência de curto-circuito no PAC, e são apresentados na tabela 2.3 como uma porcentagem da corrente de carga na máxima demanda do consumidor.

Tabela 2. 3 - Limites de distorção harmônica de corrente (I_h) em % de I_L

$V_n \leq 69kV$						
I_{cc}/I_L	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	h>35	DIHT
<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
$69kV < V_n \leq 161kV$						
<20*	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	1.25	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
$V_n > 161kV$						
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
Obs: Todo equipamento de geração é limitado a esses valores de distorção de corrente, independente da relação de curto-circuito real I_{CC}/I_L.						

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

Notas:

- Os limites apresentados na tabela 2.3 devem ser usados como valores de projeto para o "caso mais conservativo" em operação normal (condições que durem mais de uma hora). Para períodos menores, durante partidas ou condições não-usuais, esses limites podem ser excedidos em 50%.
- I_{CC} é a máxima corrente de curto-circuito no ponto de acoplamento comum.
- I_L é a corrente na máxima demanda (componente fundamental) no ponto de acoplamento comum. Esta pode ser calculada como a média das máximas correntes mensais, durante 12 meses, ou pode ser estimada.
- A tabela dos limites para as harmônicas individuais é aplicada para as componentes ímpares. Já as harmônicas pares têm seus valores restritos em 25% daqueles mostrados na referida tabela.
- Não é permitida distorção de corrente que contenha componente CC.

2.4.1.3 - Atribuição de Responsabilidades

Os procedimentos delineados na IEEE 519-1992 são destinados a limitar as correntes injetadas por consumidores e equipamentos individuais, de modo que os níveis de tensão harmônica em todo o sistema permaneçam com valores aceitáveis. Tal estratégia consiste na distribuição das responsabilidades entre o consumidor e a concessionária [22].

2.4.1.3.1 - Responsabilidades da Concessionária

A concessionária compreende os sistemas de transmissão e distribuição, a qual atende a múltiplos consumidores. Ela é responsável pela distorção harmônica de tensão no ponto de acoplamento comum (PAC). Para a maioria dos sistemas (abaixo de 69 kV), a distorção harmônica total de tensão (DTHT) deve ser menor que 5%. Isso significa que a concessionária deve garantir que condições de ressonância no sistema não resultem em níveis de distorção de tensão inaceitáveis, mesmo que todos os consumidores estejam dentro dos níveis recomendados para geração de harmônicos.

2.4.1.3.2 - Responsabilidades do Consumidor

Para consumidores individuais, a norma limita o nível da injeção de correntes harmônicas no ponto de acoplamento comum (PAC) entre o consumidor e a concessionária. Os limites recomendados são destinados para as componentes harmônicas individuais e para a distorção harmônica total de corrente (DIHT). Tais limites são expressos como uma porcentagem do nível de corrente da instalação, ao invés da componente fundamental, a fim de prover uma base comum para avaliação durante o tempo.

2.4.2 -Recomendações IEC

A IEC (*International Electrotechnical Commission*) é uma organização mundial de normatização que publica documentos para uso internacional em forma de normas, relatórios técnicos e manuais e constituem-se nos fundamentos da grande maioria das normas. No tocante a harmônicos, estes documentos contemplam os seguintes tópicos:

- IEC 1000-2-2 - Estabelece os limites de tensões harmônicas individuais e totais para baixa tensão (BT< 1kV) [24];
- IEC 1000-3-2 –Define os limites para as correntes harmônicas produzidas por equipamentos de baixa potência destinados à instalação em sistemas de BT. Seu objetivo principal é limitar a emissão harmônica pelos equipamentos eletrônicos, a fim de proteger outras cargas e componentes do sistema elétrico. É o mais completo documento voltado para o estabelecimento de limites de harmônicas geradas pelos equipamentos de baixa potência [25];
- IEC 1000-3-6 – Determina limites de emissão de harmônicos de cargas não-lineares conectadas a sistemas de média e alta tensão (MT e AT) e estabelece níveis de planejamento, que são usados com o propósito de planejamento, avaliando o impacto de todos os consumidores no sistema supridor. Estes níveis são estabelecidos pelas concessionárias para todos os níveis de tensão e podem ser considerados como objetivos internos de qualidade. Os níveis de planejamento são iguais ou menores que os índices de conformidade, sendo somente valores indicativos, pois estes serão diferentes para cada caso, dependendo da estrutura e circunstância da rede elétrica [26].

PGMEE - FEIS - UNESP

2.4.3 - Recomendações GCOI/GCPS

A recomendação nacional, elaborada pelos grupos de trabalho GCOI e GCPS, também se apresenta como um documento atual e fundamentado em procedimentos estabelecidos por reconhecidas normas internacionais. Esta recomendação estabelece limites globais e por consumidor para as tensões harmônicas individuais e limites de corrente. Os limites de corrente devem ser estabelecidos pela concessionária, com base em estudos de penetração de harmônicos em sua rede, de forma a evitar que os limites de tensão por consumidor sejam excedidos nos demais pontos do sistema, e não apenas no ponto de entrega. Os limites de distorção de tensão por consumidor e de distorção de corrente podem ser violados em alguns casos, a critério da concessionária, com base em uma análise técnica e econômica. As violações dos limites globais de tensão só devem ser aceitas em caráter temporário e em casos excepcionais, tais como indisponibilidade de equipamentos de filtragem ou contingências e, nesses casos, deve haver uma monitoração contínua dos níveis de distorção existentes no sistema. Por outro lado, nos casos em que as tensões harmônicas ou distorção harmônica total pré-existentes no ponto de entrega, verificadas através de medições, forem superiores ao nível de saturação adotado (70% dos limites globais), a concessionária pode estabelecer limites de tensão por consumidor. Os assuntos abordados acima estão relacionados nos seguintes documentos [29]:

- *"Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais"*. Fevereiro de 1993. Provê recomendações para critérios e procedimentos para o atendimento a consumidores com cargas não-lineares.
- *"Procedimentos de Medição para Aferição da Qualidade da Onda de Tensão Quanto ao Aspecto de Conformidade (distorção harmônica, flutuação e desequilíbrio de tensão)"*. Novembro de 1997. Recomenda procedimentos de medição para aferição da qualidade da tensão.

2.4.4 - Norma Européia CENELEC

A norma do CENELEC, EN 50160, estabelece os procedimentos comuns a serem empregados no contexto europeu. Define as características de qualidade a serem observadas para a tensão no ponto de acoplamento com o consumidor, nos níveis de distribuição de baixa e média tensão. As distorções harmônicas limitadas pela norma EN50160 contemplam apenas

BCpIS - FEIS - UNESP

os níveis de tensão, procurando restringir os valores de distorções individuais e totais. Esta norma não se aplica às seguintes situações: operação após uma falta e/ou através de arranjo de suprimento temporário, para manter consumidores atendidos durante processos de manutenção, construção ou perda de alimentação, em situações excepcionais que estejam fora do controle do supridor de energia, em particular: condições climáticas excepcionais ou outros incidentes naturais, atos de autoridades públicas, ações industriais (sujeitas a requerimentos legais), perdas de potência resultantes de eventos externos ou por motivo de força maior [30].

2.4.5 - Norma Sul-Africana NRS

O documento sul-africano, NRS 048, faz parte das normas mais atuais que contemplam várias diretrizes estabelecidas por outras normas conhecidas no cenário internacional. Foi elaborada para o órgão regulador NER (*National Eletricity Regulator*), por representantes da *South African Electricity Supply Industry*, através de um grupo de trabalhos designado por *Electricity Suppliers Liaison Commitee*.

A fundamentação desta norma está nas diretrizes estabelecidas pela IEC (*International Electrotechnical Commission*) e pela norma Européia (CENELEC). Adicionalmente, os termos da NRS 048 utilizaram, ainda, os relatórios e dados locais disponíveis.

A NRS 048, destinada a regulamentar a qualidade dos suprimentos elétricos, foi aprovada pelo *National Electricity Regulator* em 21 de Novembro de 1996 e define limites apenas para harmônicos de tensão. Ela é composta por:

- NRS 048-1:1996 – Apresenta uma visão geral das normas e procedimentos de medição e avaliação da qualidade de energia [31];
- NRS 048-2:1996 – Define os limites e índices de conformidade para a manutenção da qualidade da tensão nos níveis de BT, MT e AT [32];
- NRS 048-4:1996 – Orienta sobre as implicações e diretrizes para concessionárias e seus consumidores com relação à manutenção do padrão de qualidade do suprimento [33];
- NRS 048-3:1998 – Determina os procedimentos para medições e elaboração dos relatórios de análise [34];
- NRS 048-5:1998 – Define as necessidades e principais características relacionadas com a instrumentação e transdutores para monitoração e registro da qualidade da tensão [35].

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

2.4.6 - Norma Peruana NTCSE

A norma NTCSE (*Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos*) [36] foi implantada no Peru em 09 de Outubro de 1997. A mesma tem por objetivo estabelecer os aspectos, parâmetros e indicadores de qualidade da energia entregue aos consumidores pelas concessionárias, bem como a quantidade mínima e as condições de medição. Adicionalmente, o documento fixa as tolerâncias e as respectivas compensações e multas pelo não cumprimento das determinações. Somado a estes aspectos são também estabelecidas as obrigações das entidades envolvidas direta ou indiretamente com a prestação do serviço elétrico no que se refere ao controle da qualidade. O documento se baseia em grande parte do seu conteúdo, nas recomendações IEC, contemplando todas as concessionárias e consumidores, e é aplicável a clientes alimentados por baixa, média, alta e extra alta tensão.

Em Novembro de 1998, o OSINERG (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía) [37] propôs uma base metodológica para promover uma efetiva aplicação e controle da NTCSE, inclusive quanto à instrumentação e aquisição dos sinais pelos equipamentos destinados à medição dos itens de qualidade. Em Abril de 1999 foi realizada uma revisão [38], na qual se corrige e altera alguns parâmetros e tolerâncias dos níveis permissíveis para os itens de qualidade. Nessa revisão, foi também suspensa a obrigatoriedade de sua aplicação para sistemas isolados, com potência instalada de geração inferior a 5 MW. As distorções harmônicas limitadas pela norma NTCSE contemplam apenas os níveis de tensões, procurando restringir os valores de distorções individuais e totais.

- NTCSE – Normas Legales –Estabelece os aspectos, parâmetros e indicadores de qualidade da energia entregue aos consumidores pelas concessionárias. Somado a isto são também estabelecidas as obrigações das entidades envolvidas direta ou indiretamente com a prestação do serviço [36];
- NTCSE – Normas Legales – Diário Oficial El Peruano – Energia y Minas – Erratas - 17 de Octubre de 1997 – Pag. 153570 [39];
- NTCSE – *Base Metodológica para la Aplicación de la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos* – Propõe a base metodológica para promover uma efetiva aplicação e controle da NTCSE, inclusive quanto à instrumentação e aquisição dos sinais pelos equipamentos destinados à medição dos itens de qualidade [37];

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

- NTCSE – Normas Legales – Corrige e altera alguns parâmetros e tolerâncias dos níveis permissíveis para os itens de qualidade. Nessa revisão, foi também suspensa a obrigatoriedade de sua aplicação para sistemas isolados, com potência instalada de geração menor que 5 MW [38].

2.5 – Quadro comparativo

Os índices de conformidade indicados na Tabela 2.4 referem-se aos harmônicos de tensão, tanto no que se refere à distorção total, como também às componentes individuais.

***Tabela 2.4** – Resumo dos índices de conformidade para harmônicos de tensão.*

HARMÔNICAS DE TENSÃO		RECOMENDAÇÕES / NORMAS (Obs: V- tensão nominal no ponto de medição em kV)										
		IEEE 519			EN 50160	NRS 048		NTCSE		IEC	GCOI / GCPS	
		V≤69	69<V≤161	V>161	V ≤ 35	V≤44	44<V≤440	V≤60	V>60	V≤35	V<69	V≥69
Ímpares não múltiplas de 3	5	3,0	1,5	1,0	6	6	2	6	2	6	5	2
	7				5	5	2	5	2	5	5	2
	11				3,5	3,5	1,5	3,5	1,5	3,5	3	1,5
	13				3	3	1,5	3	1,5	3	3	1,5
	17				2	2	1	2	1	2	2	1
	19				1.5	1,5	1	1,5	1	1,5	2	1
	23				1.5	1,5	0,7	1,5	0,7	1,5	2	1
	25				1.5	1,5	0,7	1,5	0,7	1,5	2	1
	> 25				-	0,2 + 32,5/h	0,2 + 12.5/h	0,2 + 12,5/h	0,1 + 2,5/h	0,2 + 32,5/h	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3				5	5	2	5	1,5	5	5	2
	9				1,5	1,5	1	1,5	1,0	1,5	3	1,5
	15				0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	2	1
	21				0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	2	1
	> 21				-	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1	0,5
Pares	2				2	2	1,5	2	1,5	2	2	1
	4				1	1	1	1	1	1	2	1
	6				0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	2	1
	8				0,5	0,5	0,4	0,5	0,2	0,5	1	0,5
	10				0,5	0,5	0,4	0,5	0,2	0,5	1	0,5
	12				0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1	0,5
	> 12				0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1	0,5
TOTAL		5,0	2,5	1,5	8	8	3	8	3	8	6	3

OBS.: Os valores das distorções individuais e totais para as normas IEEE 519, NTCSE, IEC estão expressos em porcentagem do valor nominal, enquanto que a EN50160 e o GCOI/GCPS referem-se à tensão fundamental. A norma NRS 048 calcula os valores percentuais em relação à tensão real do PAC

Com exceção da IEEE 519 e da GCOI/GCPS, os limites harmônicos individuais e totais indicados nas demais normas são semelhantes aos índices recomendados pela IEC quando referenciados ao mesmo nível de tensão (BT e MT). Quanto às recomendações/normas que estipulam índices de conformidade para níveis de AT e EAT, estas são baseadas nos índices de planejamento da IEC 1000-3-6.

A recomendação brasileira GCOI/GCPS difere das demais quanto à separação das harmônicas ímpares. No documento nacional não há distinção entre as ordens ímpares múltiplas e as não múltiplas de 3 (muito embora, por uma questão de uniformidade, o quadro/resumo as separe). Por outro lado, a recomendação IEEE 519 não faz distinção entre as ordens harmônicas pares e ímpares.

2.6 – ONS (Operador Nacional do Sistema)

O ONS foi criado em 1998, com a finalidade de operar o Sistema Interligado Nacional (SIN) e administrar a rede básica de transmissão de energia em nosso país. A sua missão institucional é assegurar aos usuários do SIN a continuidade, a qualidade e a economicidade do suprimento de energia elétrica. Cabe ao ONS garantir a manutenção dos ganhos sinérgicos da operação coordenada criando condições para a justa competição entre os agentes do setor. Instituído pela lei 9.648/98 e pelo Decreto 2.655/98, o ONS teve seu funcionamento autorizado pela ANEEL, com a Resolução 351/98, e assumiu o controle da operação do SIN em 1º de março de 1999. O ONS atua como sociedade civil de direito privado, sem fins lucrativos, e opera o SIN por delegação dos agentes (empresas de geração, transmissão e distribuição de energia), seguindo regras, metodologias e critérios codificados nos Procedimentos de Rede, aprovados pelos próprios agentes e homologados pela ANEEL.

Desde o inicio de suas atividades o ONS vem atuando, com extrema diligência, no sentido de estabelecer os padrões de desempenho da rede básica, bem como os meios pelos quais estes serão acompanhados. Neste processo, o ONS tem contado com o apoio de diversos agentes e suas entidades representativas, da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), das universidades, centros de pesquisa, empresas de consultoria, fabricantes de equipamentos e sistemas de medição. Do ponto de vista dos indicadores, as pesquisas no sentido de estabelecer os padrões de desempenho da Rede Básica, bem como os processos de gestão, são baseadas na experiência acumulada no Brasil e no exterior. Particularmente apresenta-se neste trabalho apenas os padrões e regras estabelecidos pela ONS relativos aos harmônicos de tensão [42].

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

2.6.1 - Distorção Harmônica

A distorção harmônica é tratada como um fenômeno de regime permanente no sistema elétrico e tem os valores de seus indicadores normalmente apurados através de campanhas de medição realizadas em períodos de sete dias consecutivos.

Os limites globais de tensão, expressos em porcentagem da tensão fundamental, estão mostrados na Tabela 2.5 [40].

Tabela 2.5 -Limites globais de tensão, expressos em porcentagem da tensão fundamental.

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3, 5, 7	5	2, 4, 6	2	3, 5, 7	2	2, 4, 6	1
9, 11, 13	3	≥ 8	1	9, 11, 13	1,5	≥ 8	0,5
15 a 25	2	-	-	15 a 25	1	-	-
≥ 27	1	-	-	≥ 27	0,5	-	-
D = 6%				D = 3%			

Os acessantes devem assegurar que a operação de seus equipamentos, quando existirem cargas não-lineares, bem como outros efeitos dentro de suas instalações, incluindo ressonâncias, não causem distorções harmônicas no ponto de conexão acima dos limites individuais, apresentados na Tabela 2.6. Entende-se por limites individuais os máximos valores que podem ser atingidos no ponto de conexão em virtude da contribuição de um acessante, segundo um critério de apuração [41].

Tabela 2.6 -Limites individuais de tensão, expressos em porcentagem da tensão fundamental.

13.8 ≤V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3 a 25	1,5	todos	0,6	3 a 25	0,6	todos	0,3
≥ 27	0,7	-	-	≥ 27	0,4	-	-
D = 3%				D = 1,5%			

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

2.7 – Conclusões

A partir das informações sintetizadas anteriormente, pode-se tecer algumas considerações e conclusões a respeito da aplicabilidade das normas e recomendações.

As recomendações IEC formam um conjunto de diretrizes, as quais, muito embora não tenham caráter de normalização, norteiam procedimentos para a grande maioria das normas consultadas. Quanto aos limites para harmônicos, as tabelas apresentadas têm por meta atender as exigências de conformidade e planejamento. As recomendações IEC ainda sugerem limites de emissão para correntes harmônicas produzidas por equipamentos com características não-lineares de baixa potência.

O padrão IEEE 519 corresponde a um compêndio de informações correlatas às questões desde a geração dos sinais harmônicos e seus efeitos, até os problemas afeitos à medição e definição de limites. No que se refere a propostas de normalização, a citada recomendação é direcionada aos limites de distorções harmônicas individuais e totais para tensões e correntes. Deve-se ressaltar que este documento define, exatamente, a quem é atribuída a responsabilidade pelo controle de tais índices. A concessionária é responsável pelos níveis de distorção de tensão no sistema, enquanto que o consumidor deve controlar a injeção de correntes no PAC. No tocante às distorções harmônicas individuais de tensão, constata-se que não há distinção entre os limites adotados para as diferentes ordens. E ainda, é o único documento que aborda os índices de conformidade relativos às correntes harmônicas.

As recomendações do GCOI/GCPS trazem em seu conteúdo os aspectos que qualificam e quantificam os índices de conformidade referentes aos harmônicos.

A norma européia do CENELEC, EN 50160, contempla orientações quanto aos índices de conformidade para harmônicos. Quanto aos índices de conformidade para tensões harmônicas, a EN 50160 estabelece limites de distorções individuais e totais para níveis de baixa e média tensão.

A norma NRS 048 constitui-se num conjunto de diretrizes bastante abrangentes quanto aos itens de conformidade. Os limites para harmônicos são correspondentes àqueles definidos pela IEC, exceto pela complementação quanto os níveis aplicáveis às redes de alta tensão. A norma NRS 048 não traz, na sua essência, tabelas limitadoras de níveis de distorção harmônica de corrente, mas permite à concessionária a elaboração de contratos de fornecimento de energia elétrica, pelos quais ficam estabelecidos limites de violação de correntes a serem obedecidos pelo consumidor.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

A norma NTCSE apresenta um conjunto de aspectos normativos quanto às características de qualidade da energia entregue aos consumidores pelas concessionárias de energia. Este documento define em seu texto o alcance e a aplicabilidade da norma, inclusive determinando as etapas de sua aplicação. São definidas as obrigações das concessionárias, dos consumidores e também de terceiros, envolvidos nos processos de geração, transmissão, distribuição e comercialização da energia elétrica. Nesse contexto, são apresentados os limites para as distorções individuais e total de tensão harmônica.

A norma peruana é o documento mais recente dentre todos os documentos consultados e, ainda, é o único que estabelece critérios de penalização por limites não atendidos.

O ONS vem atuando, com extrema diligência, no sentido de estabelecer os padrões de desempenho da rede básica, bem como os meios pelos quais estes serão acompanhados. Neste processo, o ONS tem contado com o apoio dos diversos agentes e suas entidades representativas, da ANEEL, das universidades, centros de pesquisa, empresas de consultoria, fabricantes e representantes de sistemas e equipamentos de medição, etc. Até o momento, encontram disponíveis no documento "Padrões de desempenho da Rede Básica e Requisitos mínimos para suas instalações – submódulo 2.2", os limites globais recomendados para distorção harmônica de tensão, e no documento "Requisitos Básicos para Conexão a Rede Básica – submódulo 3.8", os limites individuais para distorções harmônicas de tensão relacionadas como os acessantes.

O mecanismo de controle das distorções de corrente ainda não foi contemplado pelas normas e recomendações da ONS. Todavia, baseado em análises preliminares apresentadas por consultores nacionais e internacionais, sugere-se que a limitação das correntes harmônicas seja realizada na forma de termos aditivos contratuais ao fornecimento de energia elétrica. Os níveis de injeções harmônicas a serem estipulados deverão respeitar a interdependência entre as correntes harmônicas e os níveis de curto-circuito para o ponto de suprimento. O estabelecimento destes limites será objeto de análise na próxima revisão do submódulo 3.8 – "Requisitos Técnicos Para a Conexão à Rede Básica" [41].

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

CAPÍTULO 3

Modelo Matemático e Índices de Desempenho

3.1 – Introdução

Os filtros harmônicos ressonantes (FHR's) são os mais antigos e mais largamente utilizados dispositivos para supressão harmônica em sistemas de distribuição. Originalmente, tais filtros eram aplicados para reduzir a distorção harmônica causada por conversores CA/CC, especialmente nos arranjos de transmissão em corrente contínua (HVDC). Estas aplicações normalmente estão associadas a intercâmbios de grandes blocos de energia e eletricamente conectadas a pontos do sistema com alto nível de curto-circuito, o que garante uma tensão de suprimento praticamente senoidal. Atualmente, os FHR's são freqüentemente usados para reduzir distorções na forma de onda causadas por cargas não-lineares distribuídas ao longo de todo os sistemas elétricos e, nestes casos, operam muitas vezes com uma tensão de suprimento substancialmente distorcida [10], [44].

Como se sabe, estes equipamentos são instalados com o objetivo de reduzir as distorções harmônicas da tensão no barramento de acoplamento (PAC) e da corrente de alimentação, causadas principalmente pelas harmônicas dominantes na corrente de carga. O FHR pode não reduzir, contudo, a distorção da forma de onda causada pelas harmônicas remanescentes da corrente de carga, ou seja, aquelas ordens harmônicas para as quais não está previsto um filtro sintonizado. Por outro lado, a distorção presente na tensão de alimentação que não está diretamente associada à corrente distorcida absorvida pela carga, mas sim à outras cargas não-lineares presentes no sistema de distribuição, também contribuem para o aumento da distorção na corrente total de alimentação. As componentes harmônicas, em ambos os casos, são responsáveis pela deterioração do desempenho do sistema de filtragem, [10], [45], [46] e serão tratadas com maiores detalhes na seqüência deste trabalho. Neste

contexto, para evitar citações repetitivas, estas componentes harmônicas são referenciadas simplesmente por harmônicas singulares, embora se reconheça a ambigüidade do termo, pois as ordens harmônicas estão associadas tanto a tensão quanto a corrente e possuem origens diferenciadas.

Embora a tecnologia dos FHR's seja conhecida há um longo tempo e seja aparentemente bem desenvolvida, o efeito das harmônicas singulares no desempenho do filtro não tem recebido o foco de atenção necessária [10], [44], [45]. Neste capítulo apresenta-se uma metodologia para avaliação sistemática da eficácia do sistema de filtragem. A partir da identificação das principais razões da deterioração da eficácia do filtro, é possível prover procedimentos complementares para o aperfeiçoamento dos métodos de projeto de um FRH.

3.2 – Modelo Matemático

A eficácia de um filtro harmônico ressonante pode ser avaliada através de modelos computacionais para simulações no domínio do tempo ou da freqüência [45]. Os modelos no domínio do tempo são baseados em um conjunto de equações diferenciais e os resultados produzidos permitem uma visualização imediata do comportamento do sistema quanto às formas de onda de tensões e correntes. Apesar de ser uma prática muito utilizada, ela apresenta algumas desvantagens, sobretudo porque, em geral, não revela as causas da diminuição da eficácia do filtro. Além disso, os resultados obtidos são válidos apenas para uma condição operacional particularmente contemplada no modelo. Desta forma, qualquer alteração na distorção harmônica ou a mudança de um simples parâmetro do sistema, faz com que a simulação seja retomada desde o início, exigindo grande esforço computacional e tornando o processo de análise lento e trabalhoso [44], [45], [47].

Uma forma alternativa para a análise do desempenho do sistema de filtragem é através do cálculo de transmitâncias e as respectivas respostas em freqüência [44], [45]. Esta metodologia está fundamentada na teoria da superposição de efeitos e é particularmente atrativa porque permite que seja investigada individualmente a influência dos diferentes parâmetros do sistema alimentador, do filtro e da carga na eficácia do filtro. Por outro lado, permite não só investigar de forma rápida e sistemática, mas também alterar o desempenho de um filtro diante de novas condições operacionais, e ainda revelar as possíveis causas da degradação da sua eficácia. Isto pode contribuir decisivamente para o aperfeiçoamento do

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

projeto dos FHR's no sentido de manter os níveis de desempenho nos limites aceitáveis diante das diferentes condições operacionais previamente estabelecidas.

Como visto, a distorção na tensão em um barramento pode ser causada não apenas por cargas não-lineares alimentadas por este barramento, mas também por outras cargas não-lineares instaladas em pontos remotos do mesmo sistema de distribuição de energia. Como a distorção harmônica pode ter origens diferentes, a tensão pode permanecer distorcida, mesmo não havendo cargas não-lineares fornecidas pelo barramento considerado. Conseqüentemente, a corrente total de alimentação pode ser distorcida, não apenas devido às cargas não-lineares alimentadas pelo barramento, mas também devido a distorção da tensão no sistema de distribuição.

Para a análise do desempenho do sistema de filtragem, considerou-se o circuito equivalente simplificado para uma das fases no barramento onde o filtro está instalado, conforme ilustrado na figura 3.1. Para viabilização teórica da aplicação do princípio da superposição, os efeitos decorrentes das não-linearidades foram representados por fontes de corrente e/ ou fontes de tensão harmônicas. Assim, o restante do circuito é composto apenas por dispositivos lineares. Os efeitos de cada ordem harmônica são computados individualmente e integralizados a partir do princípio da superposição.

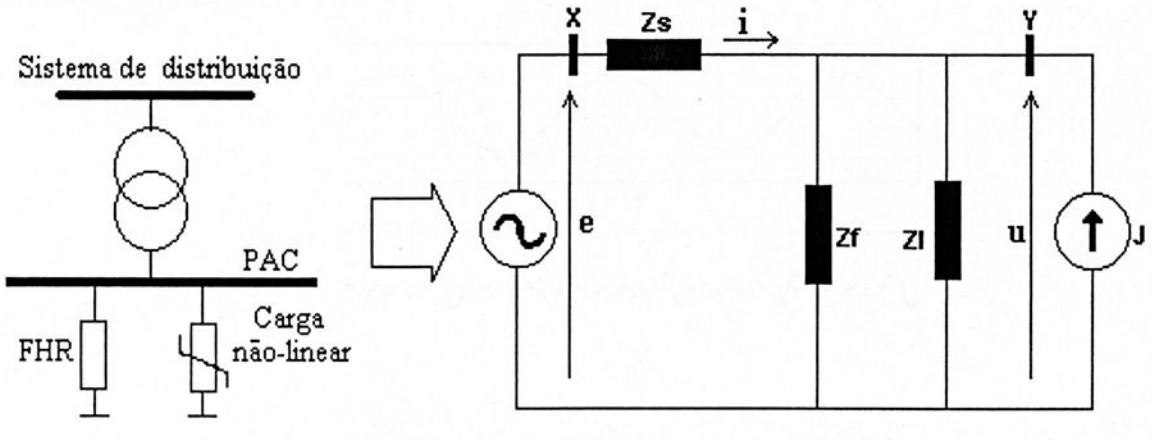


Figura 3.1-a- Circuito simplificado para uma das fases no barramento onde o filtro está instalado.
b- Circuito equivalente.

Os símbolos Z_s, Z_l e Z_f representam as impedâncias complexas equivalentes do sistema, da carga e do filtro, respectivamente. Os símbolos *e* e *u* representam os valores instantâneos da tensão do sistema de distribuição e da tensão na carga, respectivamente, enquanto *i* e j_d denotam os valores instantâneos da corrente de alimentação e da parcela

distorcida da corrente absorvida pela carga, respectivamente. A componente fundamental da corrente de carga, j_1, pode ser obtida a partir da impedância $\boldsymbol{Z}_L$. Os valores instantâneos da h-ésima componente harmônica desses valores são denotadas por e_h, u_h, i_h e j_h, respectivamente.

Conforme estabelecido na teoria de Fourier [18], cada um desses quatro valores pode ser expresso na forma de uma somatória da harmônica fundamental e da componente distorcida, identificada pelo índice '*d*', conforme apresentado nas expressões 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4.

$$e = e_1 + \sum_{h=2}^{\infty} e_h = e_1 + e_d \tag{3.1}$$

$$u = u_1 + \sum_{h=2}^{\infty} u_h = u_1 + u_d \tag{3.2}$$

$$i = i_1 + \sum_{h=2}^{\infty} i_h = i_1 + i_d \tag{3.3}$$

$$j = j_1 + \sum_{h=2}^{\infty} j_h = j_1 + j_d \tag{3.4}$$

A título de ilustração apresentam-se na figura 3.2, as componentes descritas nas expressões 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4.

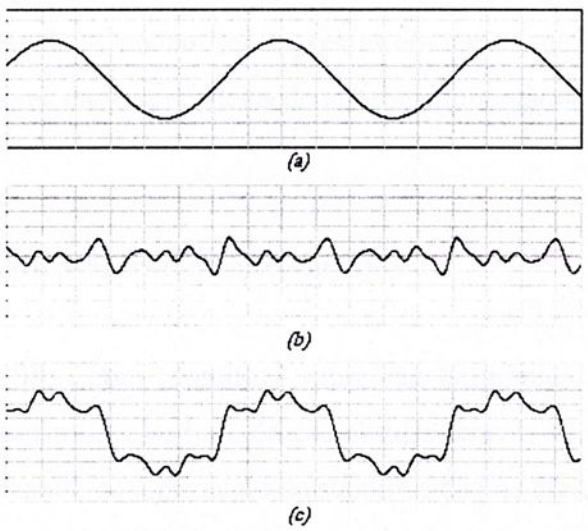
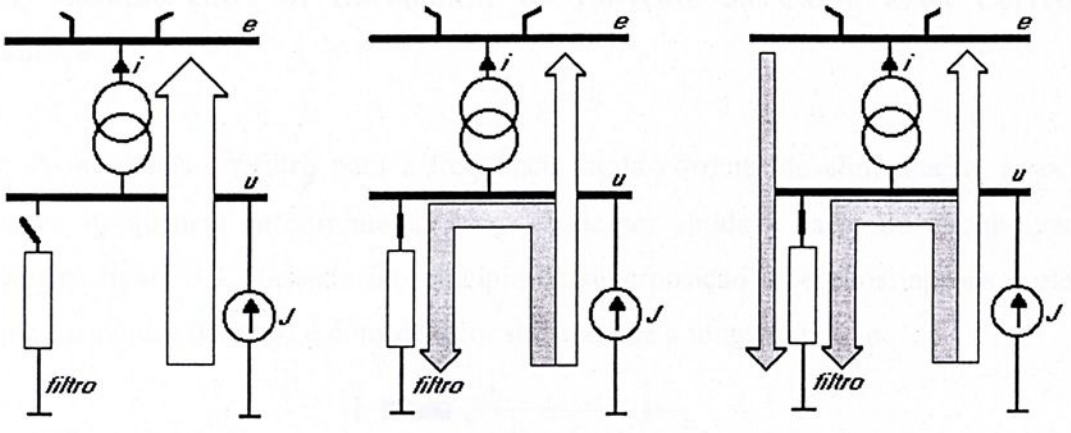


Figura 3.2-a - Componente fundamental;
b– Componente distorcida;
c – Total.

A figura 3.3-a ilustra o fluxo das correntes harmônicas geradas pela carga não-linear para o sistema de alimentação. Como visto nos capítulos anteriores, a impedância do filtro Z_f tem um valor mínimo para as harmônicas nas quais o mesmo está sintonizado e naturalmente

cria um caminho de baixa impedância para estas correntes, conforme figura 3.3-b. Conseqüentemente, o FHR reduz a distorção da corrente de alimentação i causada pelas correntes harmônicas da carga, j_h , para as quais o filtro está sintonizado. Em contrapartida, o filtro amplifica a corrente harmônica de alimentação i_h quando estas são provenientes das harmônicas da tensão de distribuição e_h de mesma freqüência, ilustrado na figura 3.3-c.



(a)- fonte harmônica (b) Ação do filtro (c) –Influência da tensão

Figura 3.3 – Fluxo de harmônicas no circuito simplificado.

A dependência entre as harmônicas da corrente de alimentação i_h, as harmônicas da tensão de barramento da carga u_h , as harmônicas da corrente de carga j_h e as harmônicas de tensão do sistema de alimentação e_h podem ser expressas em termos de quatro transmitâncias definidas em função dos valores das impedâncias do sistema alimentador, do filtro e da carga.

3.2.1 – Transmitâncias do Filtro Harmônico Ressonante

As propriedades do filtro com respeito a supressão harmônica são analisadas neste trabalho a partir de quatro transmitâncias harmônicas obtidas através do circuito simplificado ilustrado na figura 3.1b, utilizando-se o princípio da superposição de efeitos.

Embora o interesse esteja direcionado para valores discretos das componentes harmônicas com freqüências $\omega_h = h\omega_1$, as análises do comportamento das transmitâncias em função da freqüência serão realizadas na forma contínua. Este tratamento é recomendado, pois a análise discreta não contém informações sobre as freqüências de ressonância do filtro com o sistema de alimentação, uma vez que as mesmas não ocorrem nas freqüências harmônicas de sintonia dos filtros [45]. Estas freqüências de ressonâncias prejudiciais, denominadas pólos,

podem estar em uma faixa de freqüências harmônicas não previstas durante o projeto do filtro. Para isto, as grandezas apresentadas a seguir representam o comportamento para todo o espectro de freqüência e são identificadas pelo índice "ω".

3.2.1.1 - Relação entre as Harmônicas da Corrente da Carga e da Corrente de Alimentação.

A influência do filtro para a freqüência ω, da corrente de alimentação, associada a respectiva freqüência da corrente da carga, pode ser obtida a partir do circuito reduzido ilustrado na figura 3.4. Baseado no princípio da superposição de efeitos, apenas o efeito da corrente harmônica da carga é considerado, anulando-se a fonte de tensão.

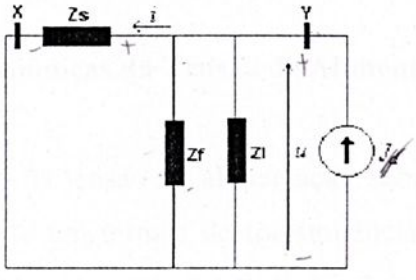


Figura 3.4 – Circuito equivalente reduzido considerando-se apenas o efeito da fonte de corrente.

As componentes no domínio da freqüência da corrente j_d são determinadas pela equação (3.5).

$$j_\omega = \left[\frac{1}{Z_{f\omega}} + \frac{1}{Z_{l\omega}} + \frac{1}{Z_{s\omega}}\right].u_\omega \qquad (3.5)$$

As componentes no domínio da freqüência da tensão de alimentação da carga não-linear são dadas por:

$$u_\omega = Z_{s\omega}.i_\omega \qquad (3.6)$$

Substituindo-se (3.6) em (3.5), obtém-se:

$$i_\omega = \left[\frac{Z_{a\omega}}{Z_{s\omega} + Z_{a\omega}}\right].j_\omega \qquad (3.7)$$

DIVISOR DE CORRENTE

Sendo:

$$Z_{a\omega} = \frac{Z_{f\omega}.Z_{l\omega}}{Z_{f\omega} + Z_{l\omega}} \qquad Zf \,\|\, Zl \tag{3.8}$$

A partir da expressão 3.7, define-se a transmitância:

$$B_{\omega} = \frac{i_{\omega}}{j_{\omega}} \tag{3.9}$$

Sendo:

$$B_{\omega} = \frac{Z_{a\omega}}{Z_{s\omega} + Z_{a\omega}} \tag{3.10}$$

3.2.1.2 - Relação entre as Harmônicas da Tensão de Alimentação e da Tensão na Carga.

O efeito das harmônicas da tensão de alimentação sobre as harmônicas da tensão na carga pode também ser expresso em termos de transmitâncias [45]. Baseado, portanto, no princípio da superposição, apenas o efeito da tensão de alimentação será considerado, anulando-se o efeito da fonte de corrente, conforme ilustrado na figura 3.5.

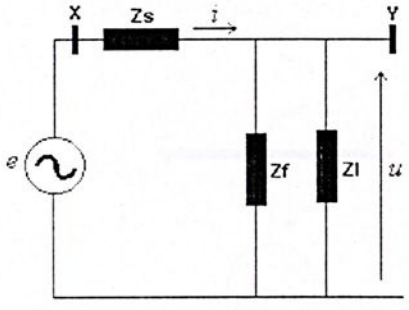


Figura 3.5 – Circuito equivalente reduzido considerando-se apenas o efeito da fonte de tensão.

A partir do circuito equivalente, tem-se:

$$i_{\omega} = \frac{e_{\omega}}{Z_{s\omega} + Z_{a\omega}} \tag{3.11}$$

Sabendo-se que:

$$u_{\omega} = i_{\omega} Z_{a\omega} \tag{3.12}$$

Substituindo-se (3.12) em (3.11), obtém-se:

$$u_\omega = \left[\frac{Z_{a\omega}}{Z_{s\omega} + Z_{a\omega}}\right] e_\omega \tag{3.13}$$

Define-se:

$$A_\omega = \frac{u_\omega}{e_\omega} \tag{3.14}$$

Sendo:

$$A_\omega = \left[\frac{Z_{a\omega}}{Z_{s\omega} + Z_{a\omega}}\right] \tag{3.15}$$

Para a análise quantitativa, foi considerado um barramento com nível de curto-circuito 40 vezes maior do que a potência ativa da carga. O fator de deslocamento da carga foi fixado em 0,71 indutivo. O sistema de filtragem do tipo FHR possui duas ramificações, com os ramos sintonizados nas freqüências de 5ª e 7ª ordens harmônicas. Adotou-se uma compensação reativa uniformemente distribuída nos ramos do filtro e fator de qualidade do indutor igual a 50. A razão entre a reatância e a resistência da impedância do sistema alimentador para a freqüência fundamental é *5,0*.

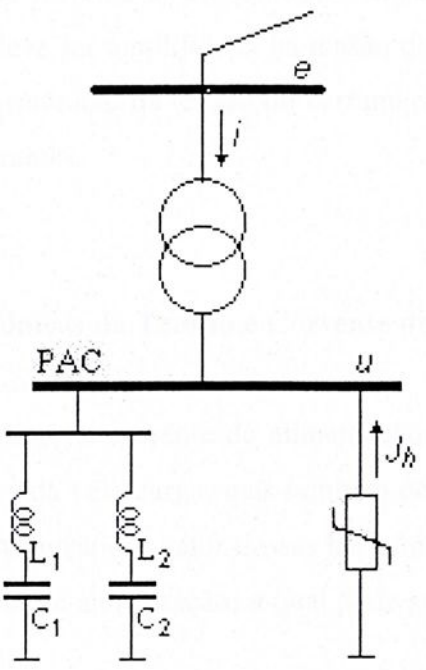


Figura 3.6- Circuito simplificado com dois filtros.

A figura 3.7 ilustra a variação das transmitâncias A_ω e B_ω.

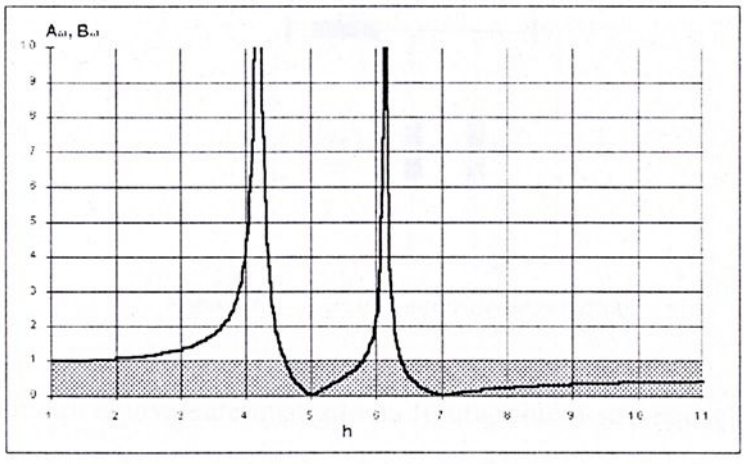


Figura 3.7 – Magnitude das transmitâncias A_ω e B_ω

Observa-se na figura acima que o nível $|B_\omega|=1$ separa a banda de atenuação da banda de amplificação harmônica. Para várias freqüências harmônicas, onde $|B_\omega|>1$, ocorre uma amplificação, ou seja, a corrente harmônica proveniente do sistema de alimentação passa a ser maior do que a harmônica correspondente gerada pela carga.

As transmitâncias A_ω e B_ω possuem significados físicos diferentes embora sejam numericamente idênticas. Portanto, todas as conclusões com respeito a amplificação das harmônicas de corrente geradas pela carga permanecem verdadeiras com respeito a amplificação das harmônicas da tensão de alimentação. Se uma harmônica remanescente da corrente de carga é amplificada na corrente de alimentação, então uma harmônica de mesma ordem da tensão de alimentação deve ser amplificada na tensão do barramento da carga [45]. Observa-se, entretanto, que as harmônicas da tensão do barramento são amplificadas devido a ressonância em série, não em paralelo.

3.2.1.3 – Relação entre as Harmônicas da Tensão e Corrente de Alimentação

Por outro lado, as harmônicas na corrente de alimentação podem ocorrer não apenas devido a corrente distorcida absorvida pela carga, mas também devido a distorção na tensão de alimentação do sistema de distribuição. O valor dessas harmônicas depende da admitância equivalente "vista" pelo barramento de alimentação, a qual pode ser obtida a partir do circuito equivalente ilustrado na figura 3.8.

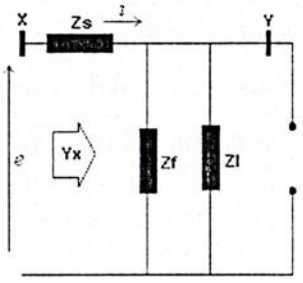


Figura 3.8 – Circuito equivalente reduzido.

A partir do circuito equivalente ilustrado na figura, obtém-se a equação 3.16.

$$Y_{x\omega} = \frac{i_\omega}{e_\omega} = \frac{1}{Z_{s\omega} + Z_{a\omega}} \tag{3.16}$$

Numa banda de freqüência imediatamente inferior a cada freqüência de sintonia, a impedância do filtro Z_f apresenta característica capacitiva e varia em um intervalo muito amplo. Então, uma ressonância em série com a indutância do sistema deve ocorrer abaixo de cada freqüência de sintonia. Esta ressonância causa o incremento da admitância Y_x. Conseqüentemente, se a tensão de alimentação apresenta uma componente harmônica e_h em uma freqüência próxima a freqüência de ressonância, esta poderá causar uma distorção substancial na corrente de alimentação degradando a eficácia do filtro [45], [46].

A figura 3.9 ilustra a variação da magnitude da admitância $Y_{x\omega}$ para o mesmo sistema descrito anteriormente.

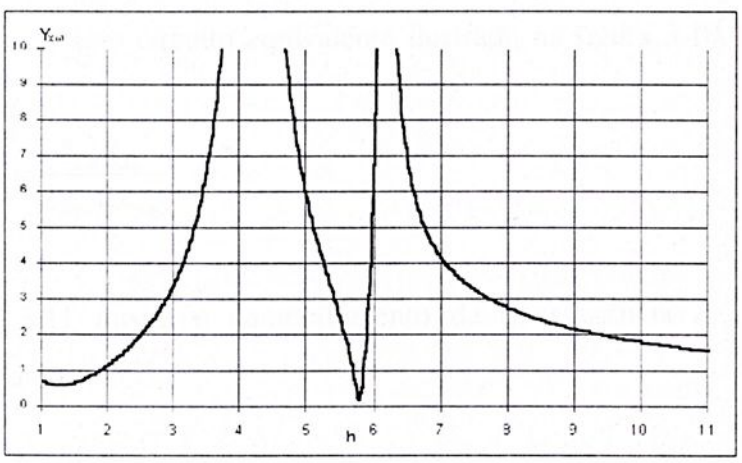


Figura 3.9 – Magnitude da admitância $Y_{x\omega}$

Para o exemplo apresentado na figura, observa-se que o filtro compensa totalmente a potência reativa Q da harmônica fundamental, então ele reduz a admitância para a harmônica

fundamental como visto a partir da alimentação para $Y_1=0.71$ p.u. Portanto, quando o nível da admitância para a harmônica de h-ésima ordem é maior do que $Y_x=0.71$, o nível de significância dessa harmônica no conteúdo harmônico total da corrente de alimentação é relativamente maior do que aquele observado no conteúdo harmônico da tensão de distribuição.

3.2.1.4- Relação entre as Harmônicas da Tensão e Corrente na Carga

Finalmente, o efeito das harmônicas da corrente de carga sobre as harmônicas da tensão na carga pode ser obtido a partir da impedância "vista" pelo barramento da carga, conforme a figura 3.10.

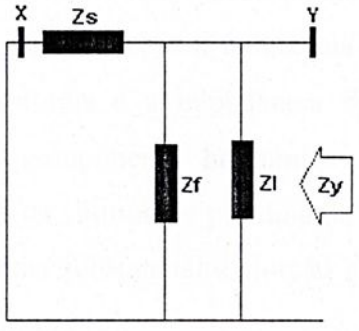


Figura 3.10 – Circuito equivalente reduzido com a impedância "vista" pelo barramento da carga.

Considerando-se o circuito equivalente ilustrado na figura 3.10, obtém-se a equação 3.17.

$$Z_{Y\omega} = \frac{u_\omega}{j_\omega} = \frac{Z_{s\omega} Z_{a\omega}}{Z_{s\omega} + Z_{a\omega}} \tag{3.17}$$

A figura 3.11 ilustra o comportamento da transmitância $Z_{Y\omega}$ para as condições descritas na figura 3.6.

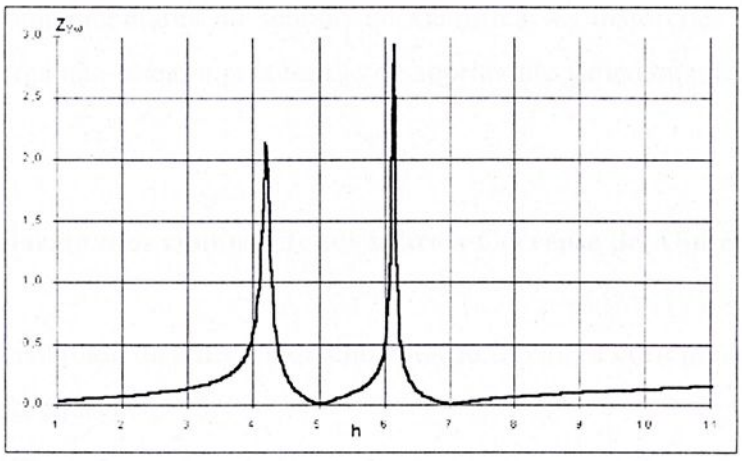


Figura 3.11 – Magnitude da impedância $Z_{Y\omega}$

Visto pela carga, o filtro está conectado em paralelo ao sistema de distribuição, sendo sua impedância capacitiva nas bandas de freqüência abaixo de cada freqüência de sintonia. Neste caso, uma ressonância em paralelo com a indutância do sistema deve ocorrer sempre abaixo de cada freqüência de sintonia e a impedância $Z_{y\omega}$ apresenta um valor elevado. Conseqüentemente, se há uma componente harmônica absorvida pela carga em uma freqüência diferente da freqüência de sintonia, e próxima da freqüência de ressonância com o sistema elétrico, poderá ocorrer uma substancial distorção na tensão no barramento da carga bem como na corrente de alimentação [46].

3.3 – Índices para Avaliação do Desempenho do Filtro

Existem, portanto, quatro causas de deterioração na eficácia do filtro [44], [45]:

- Presença de outras harmônicas de corrente de carga além daquelas nas quais o filtro está sintonizado (harmônicas remanescentes);
- Presença de harmônicas na tensão do sistema de distribuição;
- Aumento da admitância $Y_{x\omega}$ numa banda abaixo de cada freqüência de sintonia;
- Aumento da impedância $Z_{y\omega}$ numa banda abaixo de cada freqüência de sintonia.

Para o ajuste das transmitâncias no projeto de um filtro é necessário estabelecer alguns índices que permitam a avaliação sistemática do desempenho do sistema de filtragem em conjunto com os demais parâmetros da carga e do sistema de alimentação. Para isto, além dos índices de distorções harmônicas de corrente e tensão classicamente conhecidos, definem-se

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

também índices complementares no sentido de identificar as distorções parciais produzidas pela corrente da carga não-linear e pela tensão de suprimento isoladamente.

3.3.1 – Índices Relacionados com os Efeitos sobre a Corrente de Alimentação

A parcela distorcida da corrente de alimentação devido a corrente harmônica j_d gerada na carga é dada pela equação 3.18:

$$I_d(j_d) = \sqrt{\sum_{h=2} B_h^2 . J_h^2} \tag{3.18}$$

Sendo: $I_d\ (j_d)$ – Valor eficaz da parcela distorcida da corrente de alimentação devido a corrente de carga j_d;
B_h – Transmitância B para a ordem harmônica h.

Define-se:

$$\kappa_i = \frac{I_d(j_d)}{J_d} \tag{3.19}$$

Sendo: J_d – Valor eficaz da corrente distorcida da carga;

O índice κ_i reflete, portanto, a susceptibilidade do filtro para as harmônicas de corrente geradas pela carga.

O valor eficaz da componente distorcida da tensão de alimentação e_d é calculado por:

$$E_d = \sqrt{\sum_{h=2} E_h^2} \tag{3.20}$$

Esta parcela distorcida da tensão de alimentação é responsável pela corrente distorcida $i_d(e_d)$, que pode ocorrer na corrente de alimentação. O valor eficaz desta parcela é dado pela equação 3.21.

$$I_d(e_d) = \sqrt{\sum_{h=2} Y_{xh}^2 . E_h^2} \tag{3.21}$$

A razão entre esses dois valores eficazes reflete a susceptibilidade do filtro para harmônicas da tensão de alimentação. Quando esta razão é maior do que a admitância Y_{x1}, a

corrente de alimentação é mais distorcida do que a tensão *e*. Por outro lado, a razão entre essa susceptibilidade e a admitância Y_{x1}, é igual, em valor p.u., ao fator de deslocamento, λ_1.

$$\kappa_e = \frac{I_d(e_d)}{E_d Y_{x1}} \tag{3.22}$$

O filtro afeta não apenas o valor eficaz da componente distorcida desta corrente, $I_d(j_d)$, mas também o valor eficaz da sua componente fundamental I_1. Particularmente, para uma compensação total da potência reativa Q, o valor eficaz da componente fundamental é reduzido ao seu componente ativo, I_{1a}. Nestas condições, os fatores de distorção harmônica da corrente de alimentação, causadas pelas harmônicas da corrente de carga e pelas harmônicas da tensão de alimentação, num sistema com FHR, são definidas pelas expressões 3.23 e 3.24, respectivamente.

$$\partial_i(j_d) = \frac{I_d(j_d)}{I_{1a}} \tag{3.23}$$

$$\partial_i(e_d) = \frac{I_d(e_d)}{I_{1a}} \tag{3.24}$$

3.3.2 – Índices Relacionados com os Efeitos sobre a Tensão no Barramento da Carga

A tensão distorcida $u_d(j_d)$ nos terminais da carga está relacionada com as harmônicas de corrente de carga. Como, em geral, a impedância equivalente do sistema alimentador é muito menor do que a impedância equivalente da carga, é razoável assumir que I_h seja aproximadamente igual a J_h. Desta forma, na ausência de filtro, esta tensão, denotada por $u_{d0}(j)$ possui o valor eficaz dado pela equação 3.25.

$$U_{d0}(j_d) = \sqrt{\sum_{h=2}(Z_{sh}I_h)^2} \approx \sqrt{\sum_{h=2}(Z_{sh}J_h)^2} \tag{3.25}$$

Na presença do filtro, o valor eficaz da tensão $u_d(j_d)$ passa a ser dado pela equação 3.26.

$$U_d(j_d) = \sqrt{\sum_{h=2}(Z_{Yh}J_h)^2} \tag{3.26}$$

unesp

A razão entre esses dois valores eficazes, obtida pela equação 3.27, reflete o efeito do filtro na distorção da tensão do barramento na presença de harmônicas de corrente de carga, isto é, a susceptibilidade de corrente do filtro com respeito a distorção da tensão.

$$\kappa_u(j_d) = \frac{U_d(j_d)}{U_{d0}(j_d)} \tag{3.27}$$

O valor eficaz da tensão distorcida no barramento da carga pode ser calculado através da transmitância A, conforme expressão 3.28.

$$U_d(e_d) = \sqrt{\sum_{h=2} (A_h E_h)^2} \tag{3.28}$$

A relação entre os valores eficazes das parcelas distorcidas da tensão na carga e a da tensão de alimentação, dado pela equação 3.29, reflete a susceptibilidade do filtro com respeito a propagação desta distorção entre as tensões consideradas.

$$\kappa_u(e_d) = \frac{U_d(e_d)}{E_d} \tag{3.29}$$

Quando este coeficiente é maior que um, o filtro amplifica a distorção da tensão de alimentação.

Os fatores de distorção da tensão no barramento da carga, causadas pelas harmônicas da tensão de alimentação e pelas harmônicas da corrente de carga são dadas respectivamente pelas equações 3.30 e 3.31.

$$\partial_u(e_d) = \frac{U_d(e_d)}{U_1} \tag{3.30}$$

$$\partial_u(j_d) = \frac{U_d(j_d)}{U_1} \tag{3.31}$$

3.3.3 – Índices Compostos DTHT e DIHT

Os fatores de distorção harmônica global para correntes e tensões conhecidos na literatura são dados pelas expressões 3.32 e 3.33.

$$DIHT_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2} I_h^2}}{I_1} = \sqrt{\sum_{h=2} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2} \tag{3.32}$$

$$DTHT_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2} U_h^2}}{U_1} = \sqrt{\sum_{h=2} \left(\frac{U_h}{U_1} \right)^2} \tag{3.33}$$

Estes fatores são freqüentemente utilizados na prática, principalmente no sentido de identificar o grau de degradação das correntes e tensões em um sistema de energia elétrica com respeito às distorções harmônicas. São também utilizados para compor as normas e regulamentações sobre os limites máximos toleráveis para as distorções harmônicas, considerando-se os diferentes usos finais da energia elétrica. Entretanto, estes fatores são concebidos de uma forma muito sintética e não proporcionam nenhuma informação adicional sobre as origens das distorções [44], [45].

Dentro do enfoque proposto neste trabalho verifica-se que a distorção harmônica total da corrente de alimentação e da tensão no barramento da carga está diretamente relacionada com os conteúdos harmônicos, tanto da tensão de alimentação como da corrente de carga. Estas parcelas podem ser calculadas pelas equações 3.23, 3.24, 3.30 e 3.31 e apresentam informações não apenas sobre o nível de distorção, mas também sobre sua causa, isto é, se ele é causado pela carga ou pelo suprimento.

Uma composição adequada destes valores representa o DTHT e DIHT classicamente conhecidos [18]. Para isto, observa-se que as componentes harmônicas que diferem entre si nas h ordens, são mutuamente ortogonais. Nestas condições, o quadrado do valor eficaz da soma de tais harmônicas é igual a soma dos quadrados de seus valores eficazes individuais. Por outro lado, as harmônicas de mesma ordem h não têm nenhuma inter-relação de fase em particular e podem sofrer mutuamente atenuações ou amplificações, dependendo dos argumentos das transmitâncias B_h, Y_{xh}, A_h e Z_{yh}, bem como dos ângulos de fase das componentes harmônicas e_h e j_h. Visando um resultado conservativo, pode ser assumido que esses valores eficazes somam-se também de forma quadrática. Desta forma, os fatores de distorção harmônica global da corrente de alimentação e da tensão no barramento da carga podem ser expressos respectivamente pelas equações 3.34 e 3.35.

$$DIHT_i = \frac{I_d}{I_{1a}} = \frac{\sqrt{I_d (j_d)^2 + I_d (e_d)^2}}{I_{1a}} = \sqrt{\partial_i^2 (j_d) + \partial_i^2 (e_d)} \tag{3.34}$$

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

$$DTHT_u = \frac{U_d}{U_1} = \frac{\sqrt{U_d(j_d)^2 + U_d(e_d)^2}}{U_1} = \sqrt{\partial_u^2(j_d) + \partial_u^2(e_d)} \tag{3.35}$$

3.4 – Conclusões

Apresentou-se neste capítulo uma metodologia para avaliação sistemática da eficácia de sistemas de filtragem harmônica compostos por arranjos de filtros harmônicos ressonantes. As ressonâncias série e paralela com a indutância do sistema de alimentação que se verificam abaixo de cada freqüência de sintonia do sistema de filtragem são as principais responsáveis pela deterioração da eficácia do filtro na presença das chamadas harmônicas singulares. A metodologia apresentada é baseada fundamentalmente no cálculo aproximado de quatro transmitâncias vinculadas aos parâmetros do sistema alimentador, do filtro e da carga. Neste contexto, foram também estabelecidos diferentes índices auxiliares que refletem a susceptibilidade do filtro com relação às correntes harmônicas injetadas pela carga não-linear e pelas harmônicas presentes na tensão de alimentação. A análise da resposta em freqüência das transmitâncias e os resultados obtidos através dos índices auxiliares compõem uma poderosa ferramenta para a investigação da performance dos FHR's e para o aperfeiçoamento nos procedimentos de projeto.

A aplicação da metodologia baseada nas transmitâncias é particularmente atrativa porque permite uma avaliação rápida e sistemática do comportamento do filtro frente a diferentes condições de operação, envolvendo os parâmetros do sistema, o conteúdo harmônico remanescente da corrente de carga e o conteúdo harmônico da tensão de alimentação.

Os métodos convencionais baseados em simulação digital, apesar de lentos e particularizados para situações operacionais específicas, não devem ser descartados, pois também contribuem com importantes subsídios para o refinamento das metodologias de projeto.

Finalmente, conclui-se que cada uma das metodologias citadas possui, de fato, características peculiares que as tornam atrativas para a aplicação proposta. Portanto, acredita-se que os melhores resultados para o ajuste do projeto dos filtros sejam obtidos a partir do uso combinado das duas metodologias.

CAPÍTULO 4

Implementação Computacional e Estudo de Casos

4.1 – Introdução

Filtros harmônicos ressonantes, instalados em sistemas de distribuição devem cumprir duas tarefas básicas, ou seja, minimizar o conteúdo harmônico da tensão u no barramento da carga e o conteúdo harmônico da corrente de alimentação proveniente do sistema elétrico i, decorrentes da alimentação de cargas não-lineares.

Os FHR's apresentam, muitas vezes, problema de degradação de desempenho motivado pelas ressonâncias com a indutância do sistema de alimentação. Essas ressonâncias não eram particularmente nocivas e alarmantes nos sistemas de distribuição a algumas décadas atrás. As tensões dos sistemas de distribuição de energia elétrica se apresentavam praticamente livres de distorções harmônicas, ou seja, $e_h=0$, e os RHF's eram usados principalmente para proteção de sistemas de distribuição contra harmônicas individuais injetadas pelas cargas não-lineares. Neste cenário, muitas vezes, bancos de capacitores projetados para correção do fator de deslocamento, eram divididos em seções e equipados com indutores sintonizados no sentido de ampliar suas funções para os RHF's. O projeto do filtro baseava-se principalmente no método desenvolvido por Steeper e Stratford [48]. Os RHF's projetados segundo esta metodologia e instalados em sistemas com baixa distorção harmônica na tensão se mostraram dispositivos bastante eficazes [12].

Com o crescimento expressivo do uso de equipamentos baseados na eletrônica de potência, esta situação foi drasticamente alterada. Atualmente os RHF's são muitas vezes instalados em sistemas de distribuição onde a tensão de alimentação pode estar substancialmente distorcida devido às altas correntes harmônicas absorvidas por diferentes

cargas não-lineares distribuídas por toda rede elétrica. Nestas condições, como discutido no capítulo 3, os braços do sistema de filtragem também formam caminhos de baixa impedância para as harmônicas de tensão de alimentação na respectiva freqüência de sintonia. Isto causa um incremento nas harmônicas da corrente total de alimentação. Por outro lado, também é comum que a corrente de carga contenha harmônicas além daquelas para as quais o filtro está sintonizado [48].

Várias recomendações têm sido apresentadas no sentido de reduzir os efeitos das harmônicas de tensão e das harmônicas remanescentes da corrente de carga [48], [49]. Infelizmente, a interação entre os diferentes ramos sintonizados do filtro e o sistema de distribuição é, na maioria das vezes, muito complexa.

As duas tarefas básicas a serem cumpridas pelo filtro são apenas aparentemente equivalentes. Para cumprir a primeira delas, ou seja, minimizar a distorção harmônica da tensão no barramento, os ramos ressonantes do filtro devem estar sintonizados exatamente na freqüência das correntes harmônicas dominantes geradas na carga J_h . Isto aumenta, contudo, as harmônicas da corrente de alimentação i_h causadas por distorções na tensão de alimentação e_h. Para minimizar estas harmônicas, isto é, para cumprir a segunda tarefa, as ramificações do filtro deveriam ser dessintonizadas das freqüências harmônicas dominantes da corrente da carga. Isto aumenta, entretanto, a distorção da tensão do barramento u_h. Deve haver, portanto, um compromisso entre as tarefas citadas visando obter o melhor desempenho da filtragem a um custo mínimo [44], [45].

Buscando estes objetivos, observa-se que modificações intuitivas no sistema de filtragem, baseadas apenas na experiência, não têm apresentado resultados satisfatórios [47]. Em substituição, atualmente recomenda-se a aplicação de procedimentos baseados em métodos de otimização que incorporem dados relativos às condições operacionais dos sistemas de filtragem, às limitações físicas dos dispositivos constituintes dos filtros, bem como as metodologias adequadas para a avaliação sistemática do desempenho global da instalação [45].

4.2 – Metodologia para o Dimensionamento do Sistema de Filtragem

O dimensionamento do sistema de filtragem pode ser encaminhado através de dois procedimentos básicos. O procedimento mais comum baseia-se no cálculo dos parâmetros

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

dos diferentes braços do sistema de filtragem em função dos valores escolhidos para a potência reativa a ser compensada e para a freqüência de sintonia [48]. Este método possibilita o cálculo das freqüências das ressonâncias prejudiciais apenas para as ramificações individuais. O desempenho global do sistema de filtragem é investigado através de simulações digitais derivadas de modelos matemáticos dos filtros e do sistema alimentador. Se o desempenho do filtro for insatisfatório, efetua-se um novo projeto e em seguida faz-se uma nova investigação de desempenho. A compreensão limitada das causas específicas da deterioração da eficácia do filtro é a maior desvantagem desta metodologia de aproximações sucessivas, demandando muito tempo de análise e grande esforço computacional para o ajuste do projeto. O segundo procedimento baseia-se na análise da resposta em freqüência das quatro transmitâncias discutidas no capítulo 3, dadas pelas equações 4.1, 4.2, 4.3, 4.4. Esta metodologia fornece uma importante ferramenta de auxílio para o ajuste do dimensionamento do sistema de filtragem bem como para a avaliação do seu desempenho na presença de harmônicas singulares. As transmitâncias podem ser calculadas de forma relativamente simples e provêm detalhes sobre fatores importantes que afetam o desempenho dos filtros. Elas permitem identificar as principais causas da degradação da eficácia do filtro e concluir sobre como mudar os parâmetros do filtro para aperfeiçoá-lo, com tempo e esforço computacional substancialmente menores [43], [44], [45].

$$A_{\omega} = \frac{Z_{a\omega}}{Z_{s\omega} + Z_{a\omega}} \tag{4.1}$$

$$Y_{x\omega} = \frac{1}{Z_{s\omega} + Z_{a\omega}} \tag{4.2}$$

$$Z_{Y\omega} = \frac{Z_{s\omega} Z_{a\omega}}{Z_{s\omega} + Z_{a\omega}} \tag{4.3}$$

$$B_{\omega} = \frac{Z_{a\omega}}{Z_{s\omega} + Z_{a\omega}} \tag{4.4}$$

4.2.1 – Implementação Computacional

O método de análise das transmitâncias envolve o cálculo das transmitâncias

apresentadas nas equações 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 em função da freqüência, e permite investigar, de forma aproximadamente desacoplada, os efeitos individuais das harmônicas da tensão de alimentação e da corrente de carga, sobre a corrente total do sistema e a tensão no barramento da carga.

Objetivando compor um pacote computacional para suporte ao dimensionamento e análise de desempenho de sistemas de filtragem passiva, foi desenvolvido e implementado um aplicativo baseado no método da análise da resposta em freqüência das transmitâncias. A primeira versão do aplicativo foi implementada na forma de planilha de cálculo no ambiente de desenvolvimento Microsoft Excel ® [46], conforme mostrado no Apêndice I. Esta opção decorre da flexibilidade oferecida por este ambiente de programação no que se refere a sua ampla biblioteca de funções pré-programadas e, sobretudo, aos métodos de otimização disponíveis.

Apresentam-se a seguir alguns resultados obtidos por simulação digital a partir do aplicativo desenvolvido, onde são investigadas as interdependências dos parâmetros do filtro, do sistema e da carga, bem como os efeitos das harmônicas singulares sobre o desempenho da filtragem.

O sistema teste escolhido para análise apresenta as características ilustradas na tabela 4.1. O sistema de filtragem é composto por três braços de filtros sintonizados para as harmônicas de 5ª, 7ª e 11ª ordens, conforme ilustrado de forma esquemática na figura 4.1.

Tabela 4.1 – Dados do sistema teste

DADOS DO SISTEMA ALIMENTADOR E DA CARGA	
Tensão nominal do sistema (pu)	1,0
Freqüência nominal (Hz)	60
Relação X/R no ponto de acoplamento (PAC)	5
Nível de curto-circuito no PAC / Potencia ativa da carga	40
Potência aparente nominal na carga (pu)	1,0
Tensão no ponto de acoplamento (pu)	1,0
Fator de deslocamento na carga	0,710

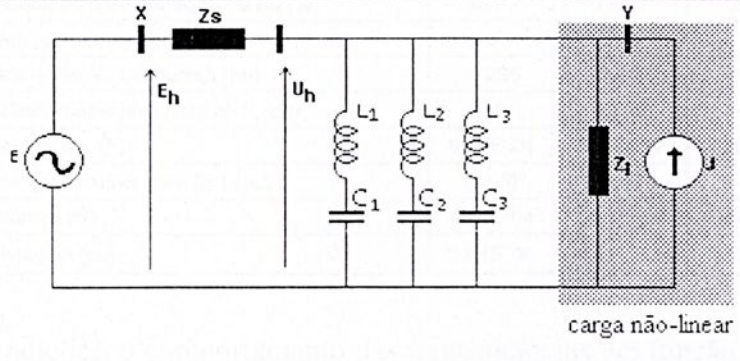


Figura 4.1 – Sistema teste com carga não-linear e FHR de quatro braços.

Os resultados iniciais obtidos através do aplicativo desenvolvido encontram-se ilustrados na tabela 4.2, conforme apresentado no Apêndice II. O dimensionamento dos braços do sistema de filtragem foi realizado admitindo-se a compensação total do fator de deslocamento, originalmente fixado em Fd=0,71 indutivo, para unitário.

Tabela 4.2 – Parâmetros calculados para o sistema teste

VARIÁVEIS CALCULADAS	
Nível de curto-circuito no PAC	28,4
Impedância de Curto-circuito no PAC (pu)	0,035
Resistência de curto-circuito no PAC (pu)	0,007
Reatância de curto-circuito no PAC (pu)	0,035
Indutância do sistema no PAC (H)	9,16E-05
Ângulo do fator de deslocamento na carga (graus)	44,77
Potência ativa na carga (pu)	0,710
Potência reativa na carga (pu)	0,704
Impedância equivalente da carga (pu)	1
Resistência equivalente da carga (pu)	0,710
Reatância equivalente da carga (pu)	0,704
Indutância da carga (H)	1,87E-03
Nível de compensação do fator de deslocamento (%)	100
Potencia reativa para compensação (pu)	-0,704
Corrente na carga compensada (pu)	0,710
Fator de deslocamento compensado	1
Ângulo do fator de deslocamento compensado (rad)	0

A potência reativa necessária para esta compensação foi dividida de forma eqüitativa entre os braços sintonizados. Em seguida, fixando-se o fator de qualidade dos reatores em 50, procedeu-se o cálculo dos indutores de sintonia para 5ª, 7ª e 11ª ordens harmônicas, conforme tabela 4.3 .

Tabela 4.3 – Dimensionamento dos braços do sistema de filtragem

Dimensionamento dos filtros	braço 1	Braço 2	Braço 3
Fator de qualidade dos reatores	50	50	50
Contribuição para correção do Fd (%)	33,33	33,33	33,33
Ordem harmônica de sintonia	5	7	11
Potência reativa capacitiva (pu)	-0,235	-0,235	-0,235
Reatância capacitiva para h=1 (pu)	4,261	4,260	4,260
Capacitância (F)	6,23E-04	6,23E-04	6,23E-04
Reatância indutiva para h=1 (pu)	0,170	0,087	0,035
Indutância (H)	4,52E-04	2,31E-04	9,34E-05
Resistência (pu)	9,04E-06	4,61E-06	1,87E-06

Nestas condições, o comportamento das transmitâncias em função da freqüência pode ser visualizado nas figuras 4.2, 4.3, 4.4.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

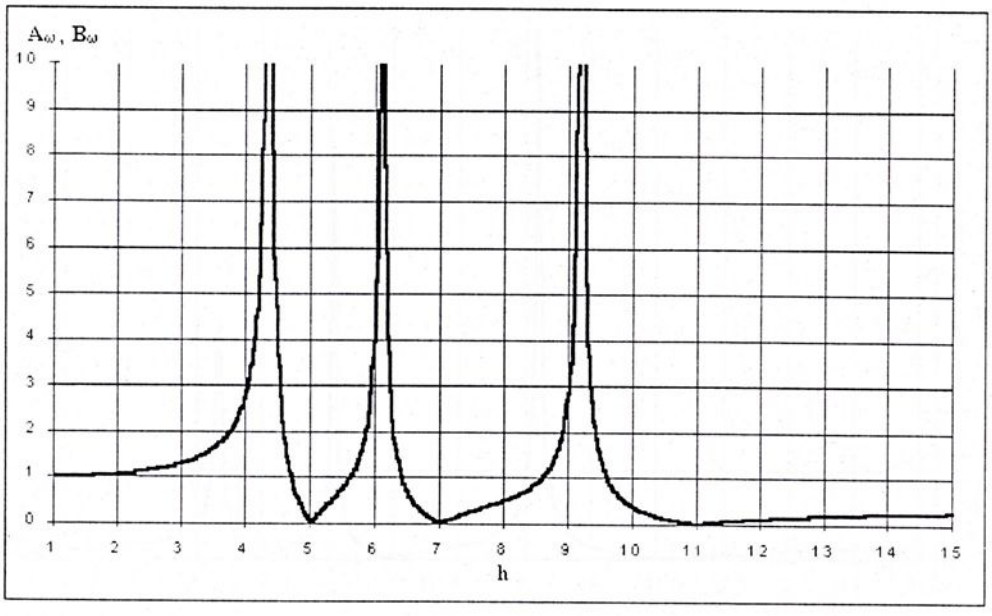


Figura 4.2 - Magnitudes das transmitâncias A_ω e B_ω.

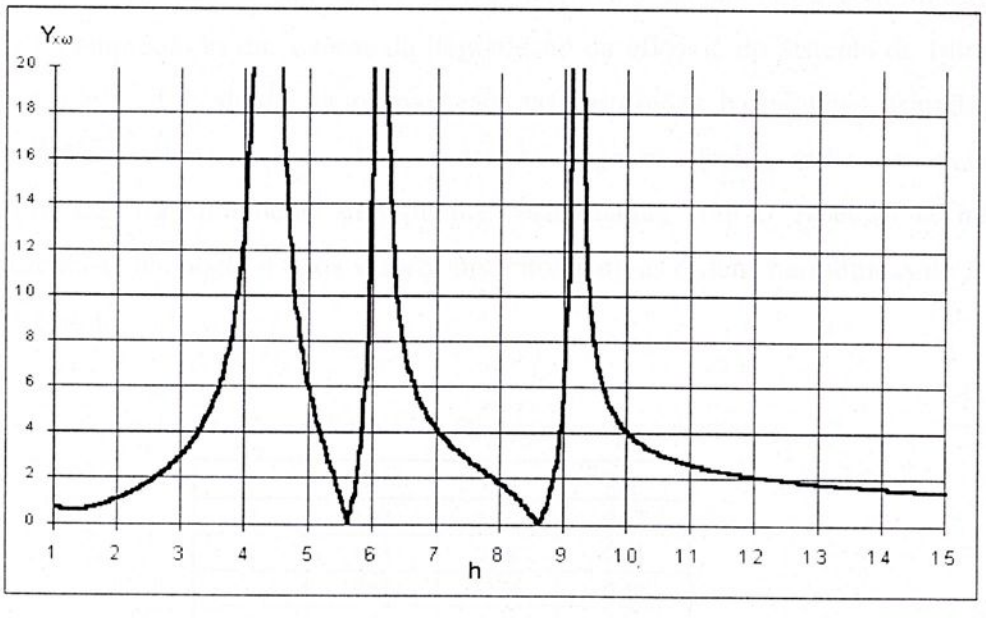


Figura 4.3 - Magnitude da admitância $Y_{x\omega}$

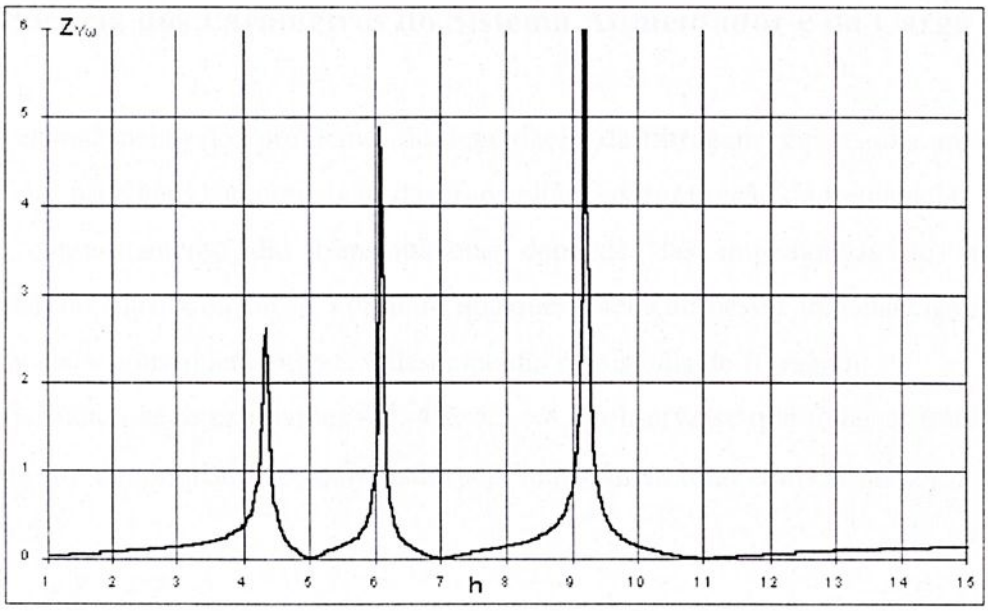


Figura 4.4 - Magnitude da impedância $Z_{Y\omega}$

Os gráficos que ilustram o comportamento das transmitâncias são indispensáveis para a identificação das freqüências de sintonia, ressonâncias, pólos, zeros, e fornecem importantes subsídios para a compreensão das causas da degradação da eficácia do sistema de filtragem. Entretanto, para efeito do cálculo da propagação das distorções harmônicas oriundas da distorção da tensão de alimentação e da corrente da carga não-linear, utiliza-se apenas os valores discretos das transmitâncias diretamente relacionadas com o espectro harmônico presente. Apresenta-se na tabela 4.4, os valores discretos para as ordens harmônicas de 2 a 15, para o caso em estudo.

Tabela 4.4 – Transmitâncias do filtro para ordens harmônicas.

h	Ah / Bh	Yxh	Zyh
2	1,07	1,10	0,07
3	1,31	3,02	0,14
4	2,88	13,68	0,40
5	0,00	5,79	0,00
6	5,03	19,51	1,04
7	0,00	4,14	0,00
8	0,51	1,79	0,14
9	2,77	5,69	0,86
10	2,88	4,02	0,13
11	0,00	2,63	0,00
12	0,12	2,11	0,05
13	0,19	1,81	0,08
14	0,23	1,60	0,11
15	0,52	1,44	0,13

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

4.3 - Influência dos Parâmetros do Sistema Alimentador e da Carga

O entendimento dos problemas de degradação da filtragem requer uma análise muito detalhada das principais características das transmitâncias em função da freqüência.

O comportamento das transmitâncias depende das impedâncias do sistema de alimentação, do filtro e da carga. Portanto, qualquer alteração nestas impedâncias afeta estas transmitâncias e, conseqüentemente, o desempenho do sistema de filtragem.

Analisando-se as expressões 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, observa-se que todas as transmitâncias apresentam um denominador comum dado pela impedância total equivalente $Z_{T\omega}$, conforme equação 4.5.

$$Z_{T\omega} = Z_{s\omega} + Z_{a\omega} \tag{4.5}$$

Nas freqüências de ressonância com o sistema de alimentação, a reatância equivalente $X_{T\omega}$ é nula e o denominador de todas as transmitâncias resume-se apenas à resistência equivalente $R_{T\omega}$. Esta resistência é relativamente baixa, e, nestas condições, as magnitudes de todas as transmitâncias apresentam altos valores, como pode ser observado nas figuras 4.2, 4.3 e 4.4. Para freqüências diferentes das freqüências de ressonância, esta impedância pode ser aproximada apenas pela reatância, conforme mostra a equação 4.6.

$$X_{T\omega} = X_{s\omega} + X_{a\omega} \tag{4.6}$$

Se os parâmetros do filtro e da carga são conhecidos, a reatância $X_{a\omega}$ pode ser facilmente calculada. Contudo, na maioria dos casos, os parâmetros da carga não são tão facilmente avaliados como os parâmetros do filtro. Afortunadamente, a impedância da carga normalmente é muito maior do que a impedância do sistema de distribuição, e sua contribuição é insignificante no comportamento das transmitâncias, e, por esta razão, não precisa ser conhecida com muita exatidão [48]. Uma avaliação superficial desta impedância é suficiente para uma boa aproximação no cálculo das transmitâncias no dimensionamento do sistema de filtragem.

O valor aproximado da reatância $X_{s\omega}$ pode ser obtido a partir da potência de curto-circuito S_{cc} no barramento. Pode ser admitido que ela cresce de forma aproximadamente linear, isto é, $X_{s\omega} = \omega X_{cc}$. Uma vez determinadas as reatâncias $X_{a\omega}$ e $X_{s\omega}$, as freqüências de ressonância podem ser obtidas a partir da equação 4.6, para $X_{T\omega}=0$. Tal aproximação é usada na figura 4.5 para identificar graficamente as freqüências de ressonância com o sistema

alimentador. Estas freqüências localizam-se nos pontos onde a curva característica de $X_{a\omega}$ intercepta a reta característica de $-X_{s\omega}$. Observa-se que a reatância $X_{a\omega}$ possui natureza capacitiva na banda de freqüência imediatamente abaixo de cada freqüência de sintonia, e, conseqüentemente, as ressonâncias devem ocorrer antes de cada uma delas.

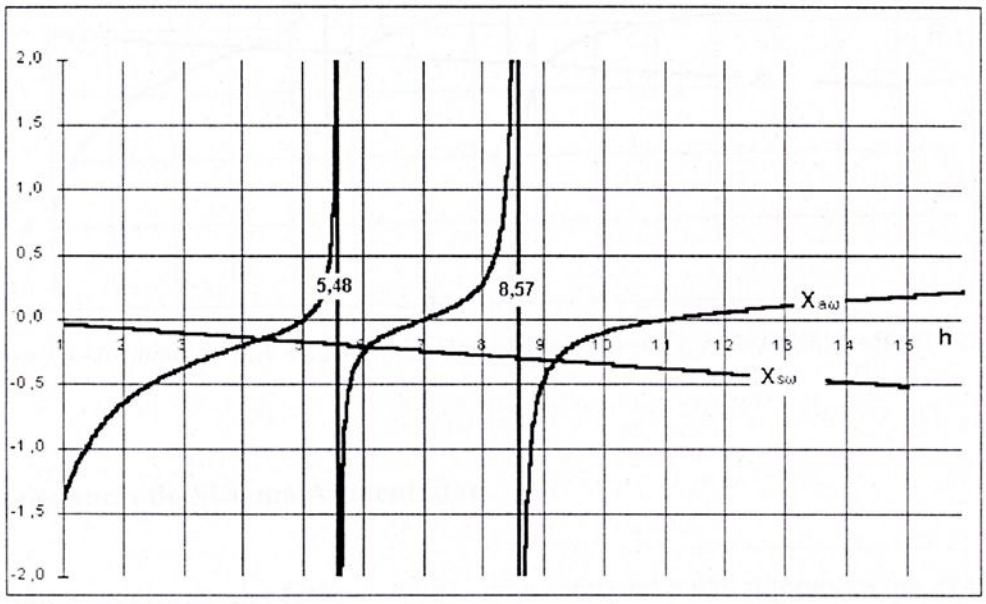


Figura 4.5 - Reatâncias $X_{a\omega}$ e $-X_{s\omega}$ para S_{cc}=28,4, X/R=5, FD=0,71, NC=100%, Q=50, Sl=1pu.

4.3.1 – Impedância da Carga

O efeito da impedância da carga sobre o comportamento das transmitâncias pode ser avaliado a partir da reatância $X_{a\omega}$. Observa-se neste caso que, se a carga aparentemente potente, como considerada no caso anterior, é reduzida à metade, os resultados colhidos por simulação digital mostram que apenas a freqüência da ressonância $\omega = 5,48.\ \omega_l$, ilustrada na figura 4.5, sofre um pequeno deslocamento para $\omega = 5,58.\omega_l$, como mostra a figura 4.6, sem que se observe nenhum outro efeito significativo sobre as transmitâncias do filtro.

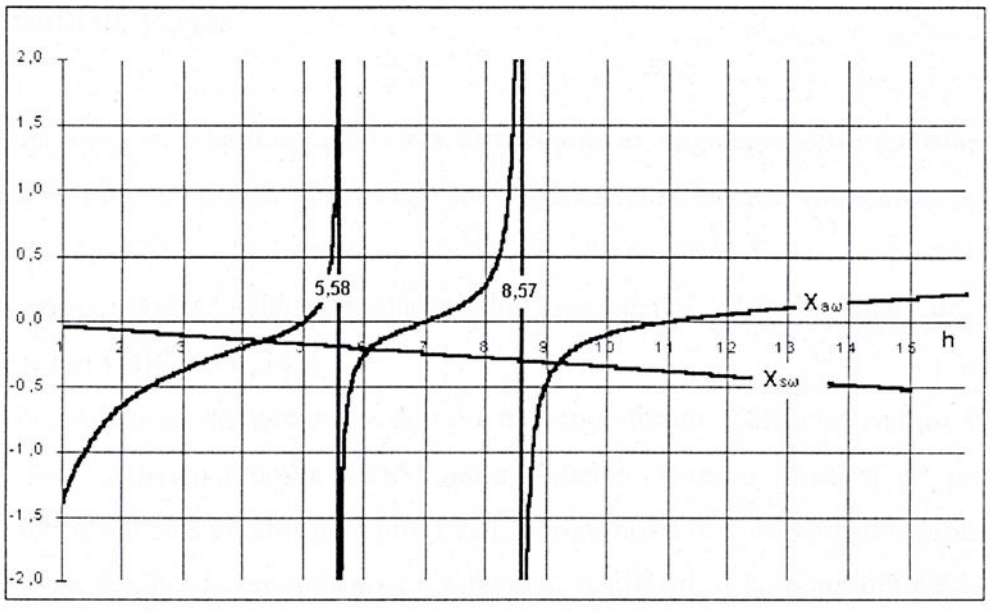


Figura 4.6 - Reatâncias $X_{a\omega}$ e $-X_{s\omega}$ para S_{cc}=28,4, X/R=5, FD=0,71, NC=100%, Q=50, Sl=0,5pu.

4.3.2 – Impedância do Sistema Alimentador

O comportamento do filtro é muito mais afetado pelas alterações na reatância do sistema de alimentação. Um acréscimo no nível de curto-circuito de S_{cc}= 28,4 para S_{cc} = *100* resulta em uma sensível variação em todas as ressonâncias, deslocando-as em direção às freqüências de maiores amplitudes, conforme ilustrado na figura 4.7. Isto reduz a sensibilidade do filtro para harmônicas de 6ª ordem da corrente de carga e da tensão de distribuição, mas, por outro lado, aumenta a sensibilidade para harmônicas de 10ª ordem.

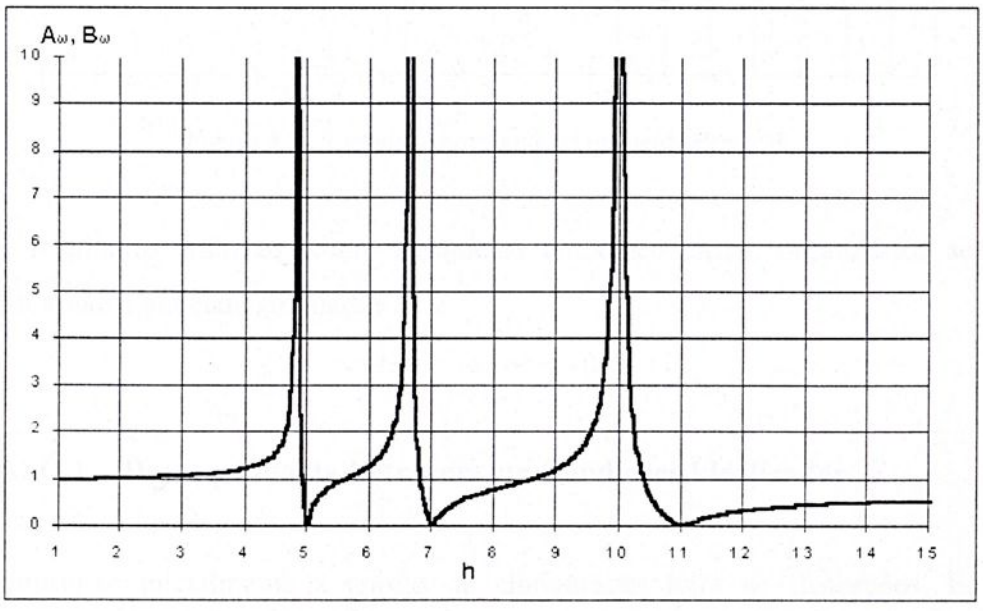


Figura 4.7 - Transmitâncias das magnitudes A_ω e B_ω, para S_{cc}=100 pu.

4.4 – Estudo de Casos

Como visto nos capítulos anteriores, as harmônicas singulares são compostas por todas as componentes harmônicas de ordens não sintonizadas no sistema de filtragem e por todas as componentes harmônicas presentes na tensão de alimentação. Estas componentes são as principais responsáveis pela degradação do desempenho dos sistemas de filtragem constituídos por FHR's [44], [45].

Para a perfeita compreensão deste fenômeno, foram realizadas várias simulações utilizando-se o aplicativo desenvolvido neste trabalho. Com o objetivo de promover a validação dos resultados obtidos pelo programa, os mesmos casos investigados foram também simulados com auxílio de um aplicativo comercial, confiável, e bastante difundido no meio científico, o *Orcad-Pspice®* da *Cadence Design Systems*. O circuito equivalente implementado no ambiente *Pspice®* é ilustrado na figura 4.8.

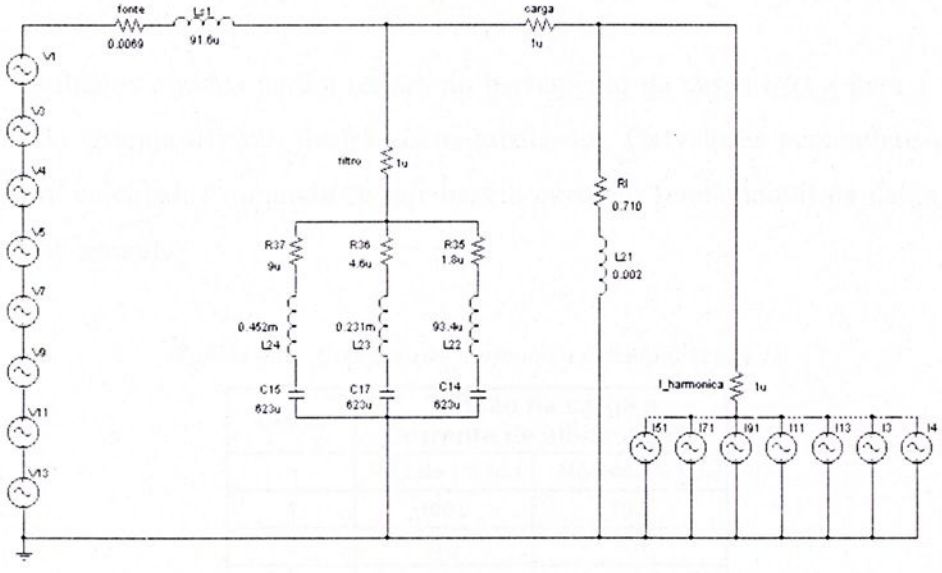


Figura 4.8 – Circuito equivalente no ambiente Pspice®.

Os resultados colhidos foram agrupados em cinco casos, organizados segundo os objetivos desejados em cada simulação.

4.4.1 - CASO 1 - Desempenho da Filtragem em Condições Idealizadas

Admitiu-se inicialmente a tensão de alimentação livre de distorções, $E_h = 0$, e a corrente da carga contendo um espectro característico de conversores de seis pulsos

controlado com potência aparente de 1.0 pu, conforme tabela 4.5. Neste caso, as harmônicas singulares são representadas apenas pela componente remanescente (não filtrada) da corrente de carga de 13ª ordem, em destaque na tabela.

Tabela 4.5 – Fontes harmônicas (caso 1).

Ordem	Tensão de alimentação		Correntes na carga	
h	Módulo (% e_1)	Fase (graus)	Módulo (% J_1)	Fase (graus)
1	100,0	0,0	100,0	-44,8
3	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	20,0	0,0
7	0,0	0,0	15,0	-20,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	9,0	0,0
13	0,0	0,0	**8,0**	-45
DHT (%)	0,0		27,6	

Os resultados obtidos para a tensão no barramento da carga *u(t)* e para a corrente de alimentação do sistema i(t) são ilustrados na tabela 4.6. Os valores percentuais de tensão e corrente foram calculados tomando-se por base a corrente fundamental na carga e a tensão fundamental no sistema.

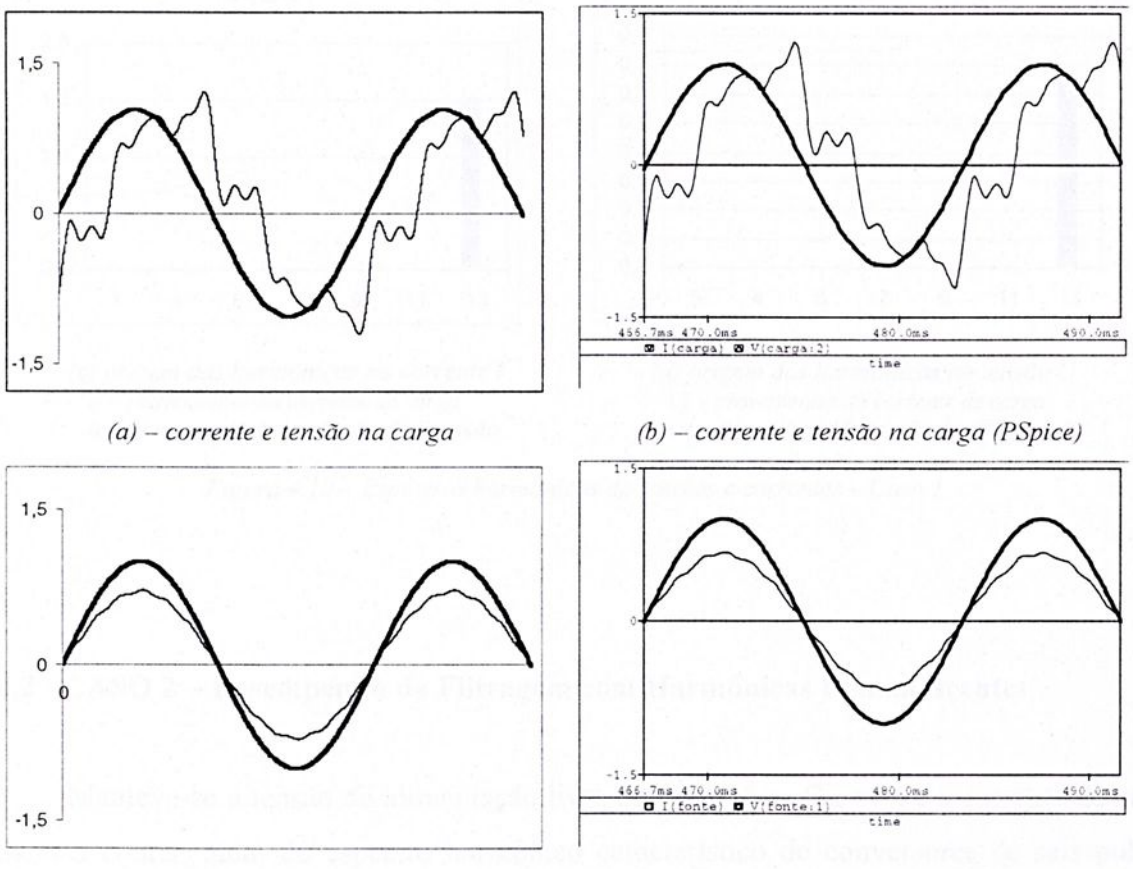
Tabela 4.6 – Composição harmônica calculada (caso 1)

Ordem	Tensão na carga e Corrente de alimentação	
h	Módulo (% u_1)	Módulo (% I_1)
1	100,0	70,7
3	0,0	0,0
4	0,0	0,0
5	0,0	0,0
7	0,0	0,0
9	0,0	0,0
11	0,0	0,0
13	0,7	1,5
DHT (%)	0,66	1,51

Constatações: O sistema de filtragem reduz substancialmente a distorção da corrente de alimentação para 1,51% e a distorção da tensão do barramento da carga fica limitada a 0,66%. Admitindo-se que o sistema estudado opere com nível de

tensão inferior a 69 kV e considerando-se os limites fixados pela Norma IEEE 519 (tabela 2.1), é possível concluir que tanto as distorções individuais quanto a distorção total da tensão no PAC encontram-se dentro dos limites pré-estabelecidos. Com relação à corrente de alimentação, o mesmo pode ser observado, uma vez que a relação I_{cc}/I_L para o sistema em estudo é 40, conforme tabela 4.1 e, portanto, situa-se na faixa entre 20 e 50, onde os limites para a 13ª ordem harmônica e distorção harmônica total são, respectivamente, 3,5% e 8%.

A figura 4.9 ilustra as formas de onda das correntes e tensões obtidas através do aplicativo desenvolvido, bem como as respectivas convalidações pelo PSpice. Observa-se nas figuras 4.9-c e 4.9-d a eficácia do sistema de filtragem com respeito à compensação total do fator de deslocamento e eliminação das componentes harmônicas sintonizadas.



(a) – corrente e tensão na carga

(b) – corrente e tensão na carga (PSpice)

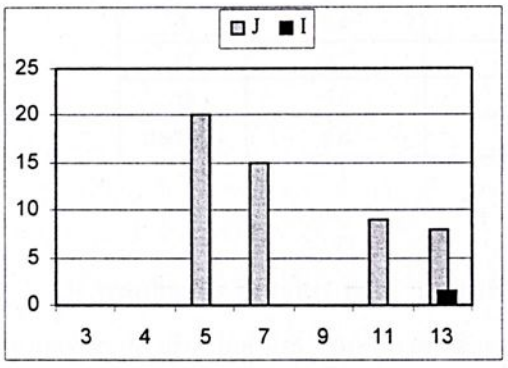
(c) – corrente e tensão de alimentação

(d) – corrente e tensão no sistema (Pspice)

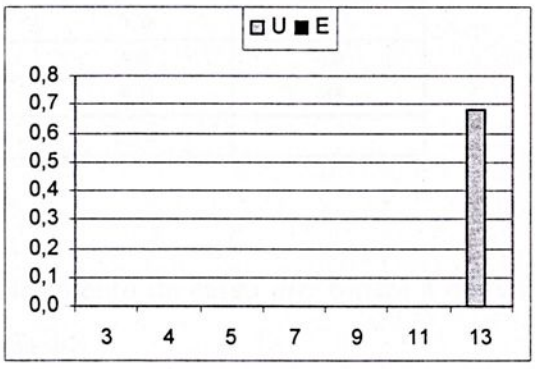
Figura 4.9 – Resultados Simulados - Caso 1

—Tensões —Correntes

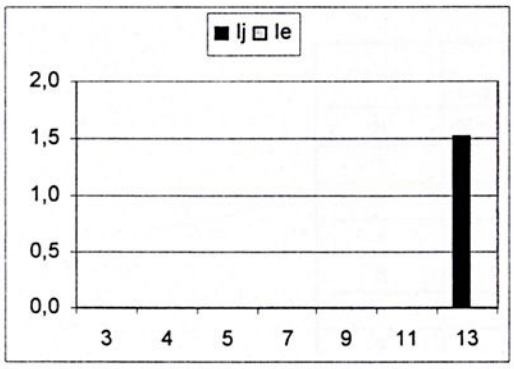
Apresenta-se nas figuras 4.10-a e 4.10-b, as amplitudes e os respectivos espectros harmônicos das correntes e tensões envolvidas no estudo, e nas figuras 4.10-c e 4.10-d a origem da composição dos conteúdos harmônicos. Neste caso particular, a 13ª ordem harmônica se deve unicamente a corrente de carga.



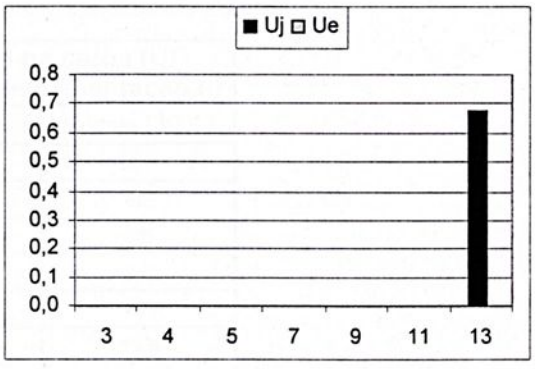
(a) correntes harmônicas



(b) tensões harmônicas



(c) origem das harmônicas na corrente I
Ij – provenientes da corrente de carga
Ie – proveniente da tensão de alimentação



(d) origem das harmônicas na tensão U
Uj – provenientes da corrente de carga
Ue – proveniente da tensão de alimentação

Figura 4.10 – Espectros harmônicos de tensões e correntes – Caso 1

4.4.2 - CASO 2 - Desempenho da Filtragem com Harmônicas Remanescentes

Manteve-se a tensão de alimentação livre de distorções, (E_h =0), e a corrente da carga passou a conter, além do espectro harmônico característico de conversores de seis pulsos, harmônicas remanescentes de 3ª e 9ª ordens, conforme tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Fontes Harmônicas (caso 2)

Ordem	Tensão de alimentação (E)		Corrente na carga (J)	
h	Módulo (% e_1)	Fase (graus)	Módulo (% J_1)	Fase (graus)
1	100,0	0,0	100,0	-44,8
3	0,0	0,0	**3,0**	**0,0**
4	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	20,0	0,0
7	0,0	0,0	15,0	-20,0
9	0,0	0,0	**5,0**	**0,0**
11	0,0	0,0	9,0	0,0
13	0,0		**8,0**	-45
DHT (%)	0,0		28,4	

Os resultados obtidos para a tensão no barramento da carga *u(t)* e para a corrente de alimentação do sistema i(t), são ilustrados na tabela 4.8.

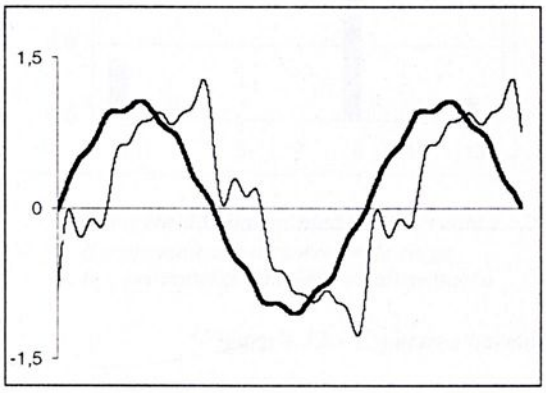
Tabela 4.8 – Composição harmônica calculada (caso 2)

Ordem	Tensão na carga (U) Corrente de alimentação (I)	
H	Módulo (% u_1)	Módulo (% J_1)
1	100,0	70,7
3	0,4	3,9
4	0,0	0,0
5	0,0	0,0
7	0,0	0,0
9	4,3	13,8
11	0,0	0,0
13	0,7	1,5
DHT (%)	4,2	14,5

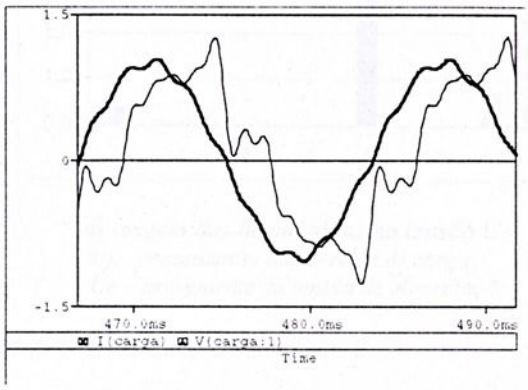
Constatações: A presença das harmônicas remanescentes de 3ª e 9ª ordens compromete consideravelmente a eficácia do sistema de filtragem. Observa-se, neste caso, a violação dos limites estabelecidos pela norma IEEE 519 para corrente harmônica individual e total e para tensão individual. Embora os limites individuais das harmônicas remanescentes estejam dentro dos limites estabelecidos na norma IEEE 519, ou seja, são inferiores a 7%, o mesmo não acontece para a corrente injetada no sistema, que apresenta uma distorção individual de 9ª ordem harmônica no valor de 13,8%. Este fato se deve, particularmente, à característica da transmitância B_h, que, para a 9ª ordem,

encontra-se na região de amplificação harmônica. Neste caso, a corrente de 9ª ordem harmônica da corrente da carga é refletida para a corrente de alimentação na razão de 2,77, conforme tabela 4.4 (B_9 = 2,77). O mesmo pode ser observado com relação a tensão no barramento de carga, onde se constata a uma violação do limite individual de 3% estabelecido na norma, neste caso devido à transmitância Z_9 = 0,86.

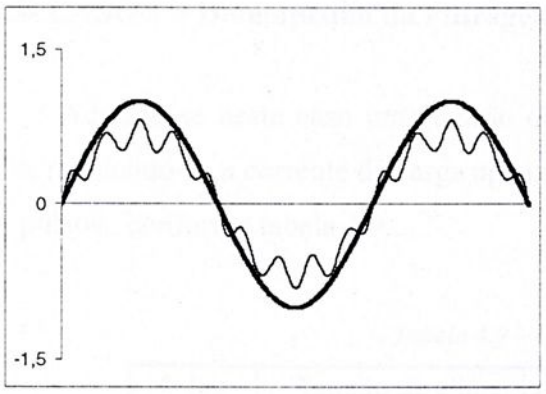
A figura 4.11 ilustra as formas de onda das correntes e tensões obtidas para este caso. Observa-se nas figuras 4.11-c e 4.11-d a degradação da eficácia do sistema de filtragem através das deformações nas formas de onda da corrente de alimentação e da tensão no barramento da carga, motivados principalmente pela componente de 9ª ordem harmônica.



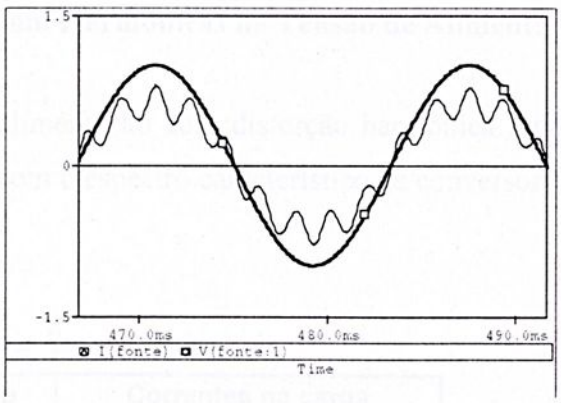
(a) – corrente e tensão na carga



(b) – corrente e tensão na carga (PSpice)



(c) – corrente e tensão de alimentação

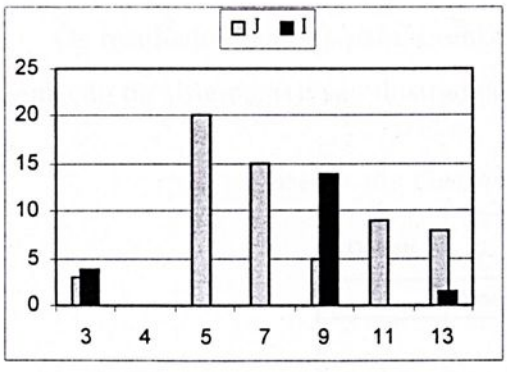


(d) – corrente e tensão no sistema (Pspice)

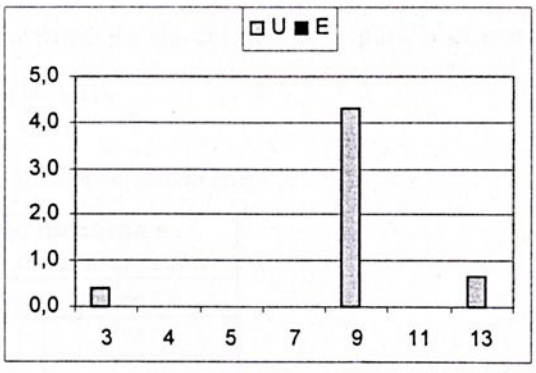
Figura 4.11 – Resultados Simulados - Caso 2

—Tensões —Correntes

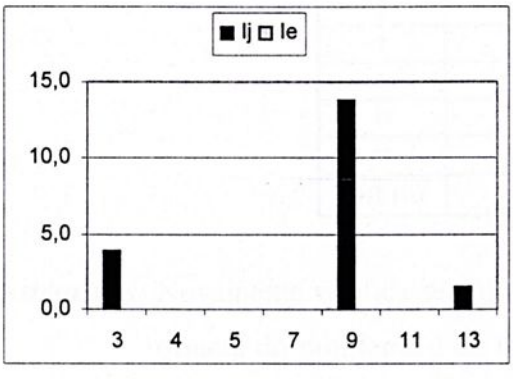
Apresenta-se nas figuras 4.12-a e 4.12-b, as amplitudes e os respectivos espectros harmônicos das correntes e tensões envolvidas no estudo, bem como as origens da composição dos conteúdos harmônicos, que são mostrados nas figuras 4.12-c e 4.12-d. Observa-se que a 13ª ordem harmônica se deve unicamente a corrente de carga.



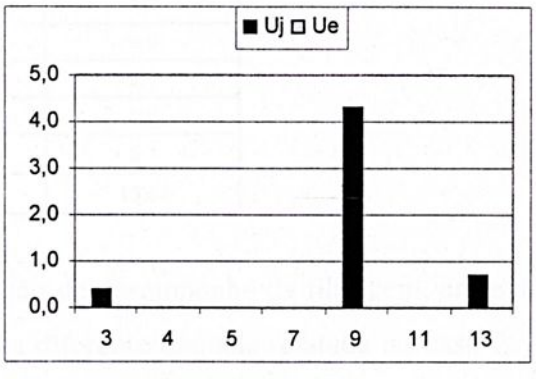
(a) correntes harmônicas



(b) tensões harmônicas



(c) origem das harmônicas na corrente I
Ij – provenientes da corrente de carga
Ie – proveniente da tensão de alimentação



(d) origem das harmônicas na tensão U
Uj – provenientes da corrente de carga
Ue – proveniente da tensão de alimentação

Figura 4.12 – Espectros harmônicos de tensões e correntes – Caso 2

4.4.3- CASO 3 - Desempenho da Filtragem com Harmônicas na Tensão de Alimentação

Admitiu-se neste caso uma tensão de alimentação com distorção harmônica total de 3,2%, mantendo-se a corrente da carga apenas com o espectro característico de conversores de seis pulsos, conforme tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Fontes Harmônicas (caso 3)

Ordem	Tensão de alimentação		Correntes na carga	
h	Módulo (% e_1)	Fase (graus)	Módulo (% J_1)	Fase (graus)
1	100,0	0,0	100,0	-44,8
3	**2,0**	-30,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0
5	**1,5**	0,0	20,0	0,0
7	**1,2**	0,0	15,0	-20,0
9	**0,9**	0,0	0,0	0,0
11	**1,0**	0,0	9,0	0,0
13	**1,0**	0,0	**8,0**	-45
DHT (%)	3,2		27,6	

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

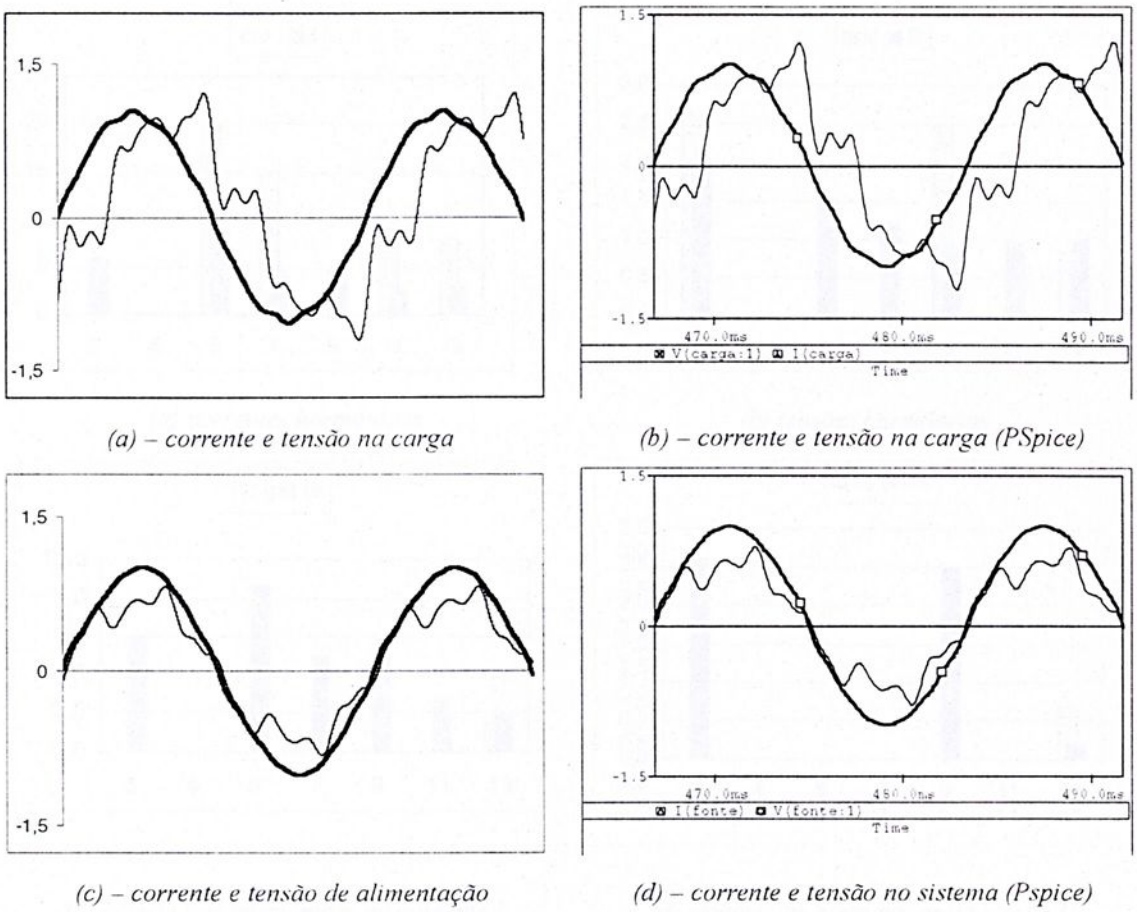
Os resultados obtidos para a tensão no barramento da carga *u(t)* e para a corrente de alimentação do sistema i(t), são ilustrados na tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Composição harmônica calculada (caso 3)

Ordem	Tensão na carga e Corrente de alimentação	
h	Módulo (% u_1)	Módulo (% I_1)
1	100,0	70,7
3	2,6	6,0
4	0,0	0,0
5	0,0	8,7
7	0,0	5,0
9	2,5	5,1
11	0,0	2,6
13	0,8	3,1
DHT (%)	1,93	13,38

Constatações: Novamente verifica-se a degradação do desempenho da filtragem, entretanto, a origem do problema é de natureza diferente daquela relatada no caso 2. Neste caso, a eficácia fica comprometida devido à distorção harmônica da tensão do sistema alimentador ($E_d \neq 0$). Para o caso analisado, os limites para distorção harmônica individual e total da tensão não são violados. O mesmo não se aplica para a corrente de alimentação, onde se observa a ultrapassagem do limite individual para a 5ª ordem harmônica, bem como para a distorção total. Como visto, neste caso, os efeitos refletidos para a tensão na carga e para a corrente de alimentação estão associados aos valores das transmitâncias A_h e Y_h, respectivamente, conforme tabela 4.4.

As formas de onda de tensão e corrente para este caso são apresentadas na figura 4.13.



(a) – corrente e tensão na carga

(b) – corrente e tensão na carga (PSpice)

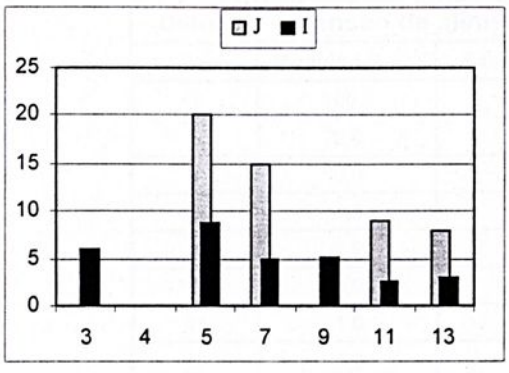
(c) – corrente e tensão de alimentação

(d) – corrente e tensão no sistema (Pspice)

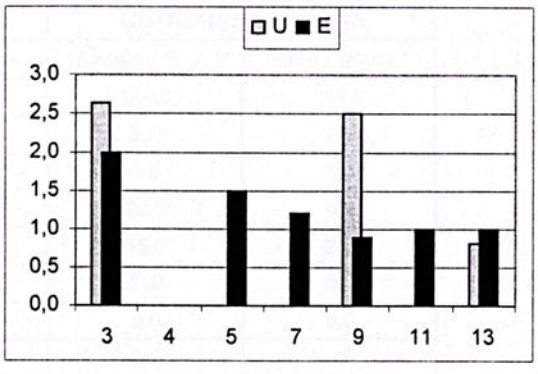
Figura 4.13 – Resultados Simulados - Caso 3

—Tensões —Correntes

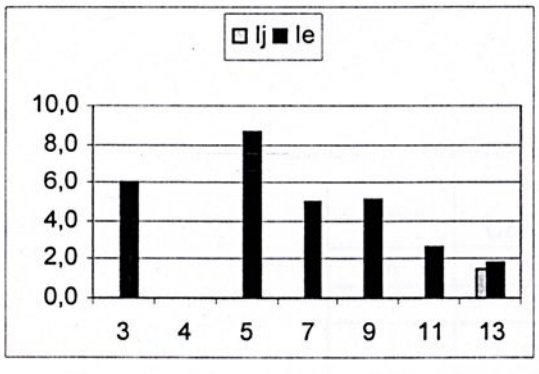
As figuras 4.14-a e 4.14-b mostram as amplitudes e os respectivos espectros harmônicos das correntes e tensões envolvidas no estudo. Observa-se que, particularmente, a distorção individual de 13ª ordem da corrente de alimentação tem origem tanto na tensão de alimentação como na corrente de carga, que são refletidas pelas transmitâncias Y_h e B_h, respectivamente e as demais ordens harmônicas são originadas apenas da distorção de tensão, figuras 4.14- c e 4.14- d. O mesmo ocorre para a tensão no barramento da carga, observando-se que as transmitâncias envolvidas são agora Z_h e A_h.



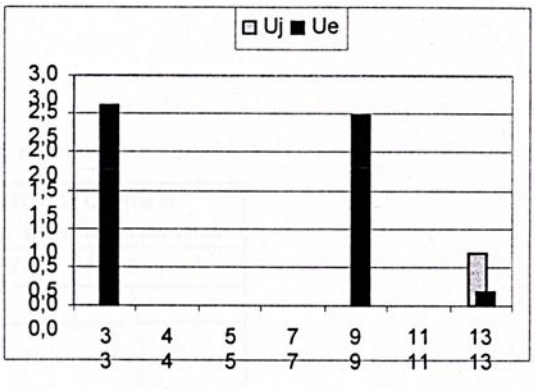
(a) correntes harmônicas



(b) tensões harmônicas



(c) origem das harmônicas na corrente I
Ij – provenientes da corrente de carga
Ie – proveniente da tensão de alimentação



(d) origem das harmônicas na tensão U
Uj – provenientes da corrente de carga
Ue – proveniente da tensão de alimentação

Figura 4.14 – Espectros harmônicos de tensões e correntes – Caso 3

4.4.4 - CASO 4 - Desempenho da Filtragem com Harmônicas Remanescentes e Distorção na Tensão de Alimentação

A tensão de alimentação foi mantida com uma taxa de distorção de 3,2%, e a corrente da carga contendo, além do espectro harmônico característico de conversores de seis pulsos, harmônicas remanescentes de 3ª e 9ª ordens. O conteúdo harmônico é ilustrado na tabela 4.11, com destaque para as harmônicas singulares.

Os resultados obtidos para a tensão no barramento da carga *u(t)* e para a corrente de alimentação do sistema i(t), são ilustrados na tabela 4.12.

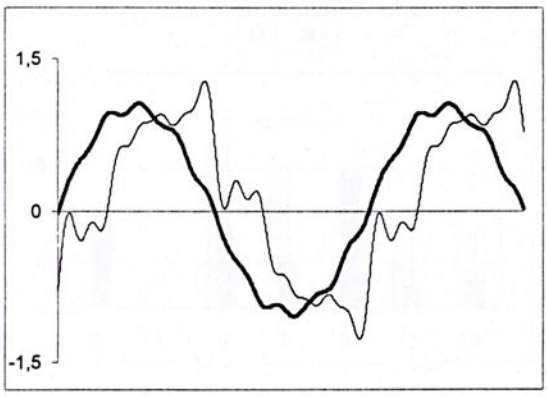
Ordem	Tensão de alimentação		Correntes na carga	
h	Módulo (% e_1)	Fase (graus)	Módulo (% J_1)	Fase (graus)
1	100,0	0,0	100,0	-44,8
3	2,0	-30,0	**3,0**	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0
5	1,5	0,0	20,0	0,0
7	1,2	0,0	15,0	-20,0
9	0,9	0,0	**5,0**	0,0
11	1,0	0,0	9,0	0,0
13	1,0	0,0	**8,0**	-45
DHT (%)	3,20		28,40	

Tabela 4.12 – Composição harmônica calculada (caso 4)

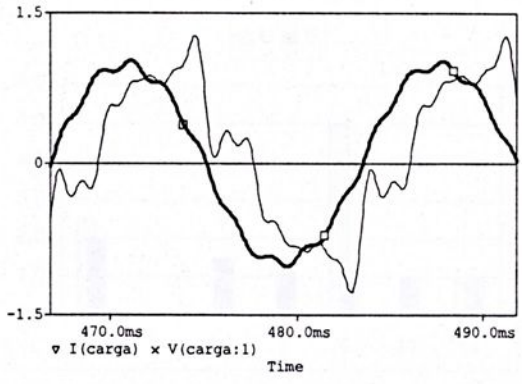
Ordem	Tensão na carga e Corrente de alimentação	
h	Módulo (% u_1)	Módulo (% I_1)
1	100,0	70,7
3	2,5	8,8
4	0,0	0,0
5	0,0	8,7
7	0,0	5,0
9	5,0	14,8
11	0,0	2,6
13	0,8	3,1
DHT (%)	5,65	20,32

Constatações: A degradação do desempenho da filtragem é proveniente de duas origens, a distorção da tensão do sistema de alimentação e a distorção da corrente da carga. Para a corrente de alimentação, verifica-se a ultrapassagem dos limites individuais para as harmônicas de 3ª, 5ª e 9ª ordens, assim como para a distorção harmônica total. Registra-se também a violação do limite individual para a 9ª ordem harmônica da tensão no barramento da carga e para a distorção harmônica total.

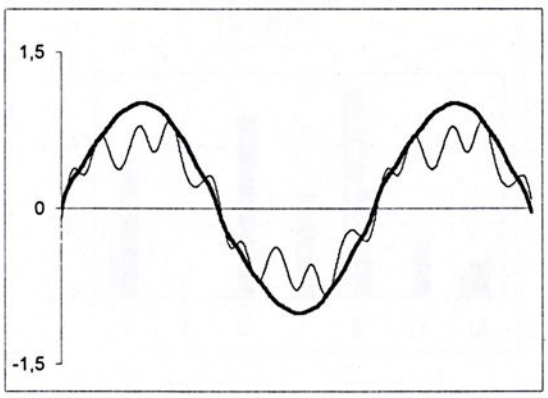
As formas de onda de tensão e corrente para este caso são apresentadas na figura 4.15.



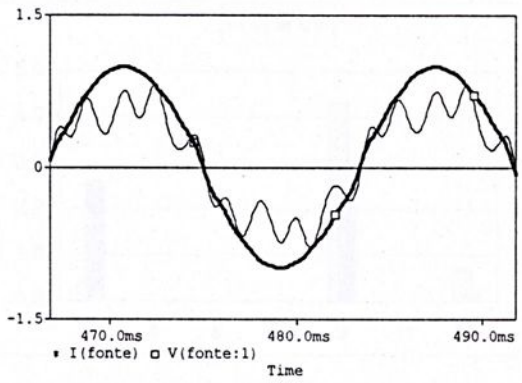
(a) – corrente e tensão na carga



(b) – corrente e tensão na carga (PSpice)



(c) – corrente e tensão de alimentação

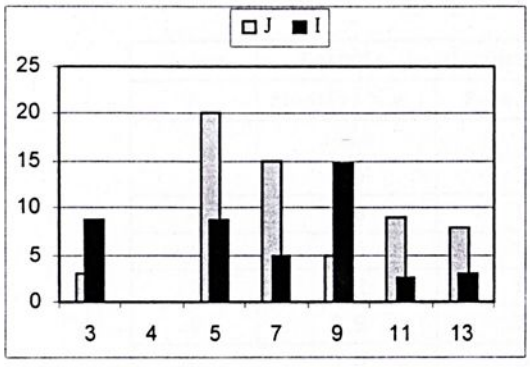


(d) – corrente e tensão no sistema (Pspice)

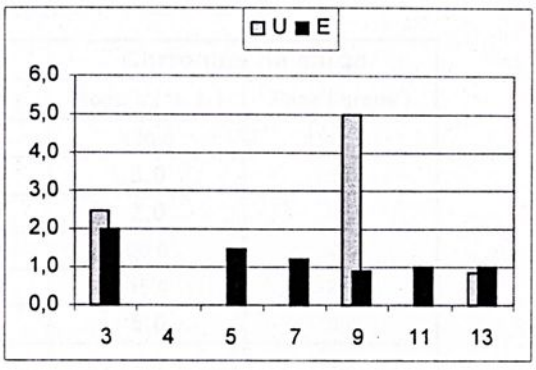
Figura 4.15 – Resultados Simulados - Caso 4

—Tensões —Correntes

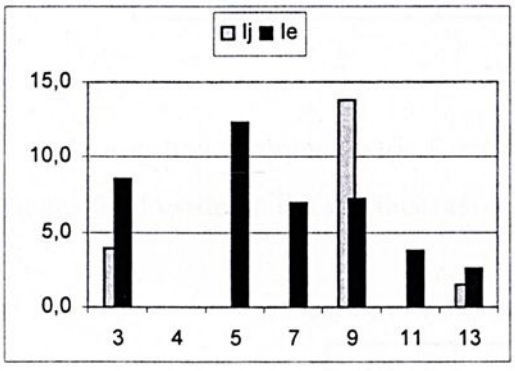
As distorções individuais de 3ª, 9ª e 13ª ordens da corrente de alimentação e da tensão no barramento da carga apresentam contribuições provenientes tanto da corrente de carga quanto da tensão de alimentação, refletidas segundo suas transmitâncias específicas, conforme mostram as figuras 4.16-c e 4.16-d.



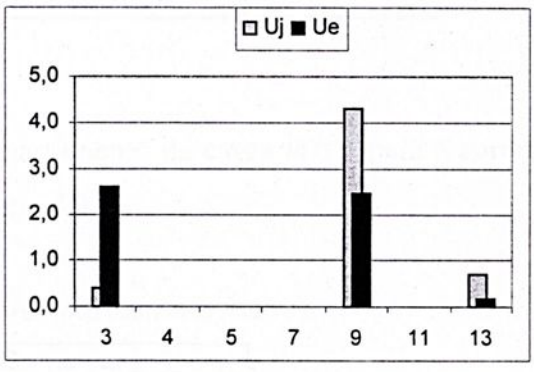
(a) correntes harmônicas



(b) tensões harmônicas



(c) origem das harmônicas na corrente I
Ij – provenientes da corrente de carga
Ie – proveniente da tensão de alimentação



(d) origem das harmônicas na tensão U
Uj – provenientes da corrente de carga
Ue – proveniente da tensão de alimentação

Figura 4.16 – Espectros harmônicos de tensões e correntes – Caso 4

4.4.5 - CASO 5: Desempenho da Filtragem com Harmônicas Remanescentes e Distorção na Tensão de Alimentação

As distorções da tensão de alimentação e da corrente de carga foram aumentadas para 3,4% e 28,4% respectivamente, através da inclusão de ordens harmônicas pares. O conteúdo harmônico total para este caso é ilustrado na tabela 4.13, onde é destacado o conjunto de harmônicas singulares.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

Tabela 4.13 – Fontes Harmônicas (caso 5)

Ordem	Tensão de alimentação		Correntes na carga	
h	Módulo (% e_1)	Fase (graus)	Módulo (% J_1)	Fase (graus)
1	100,0	0,0	100,0	-44,8
3	**2,0**	**-30,0**	**3,0**	0,0
4	**1,0**	**0,0**	**2,0**	0,0
5	**1,5**	**0,0**	20,0	0,0
7	**1,2**	**0,0**	15,0	-20,0
9	**0,9**	**0,0**	**5,0**	0,0
11	**1,0**	**0,0**	9,0	0,0
13	**1,0**	**0,0**	**8,0**	-45
DHT (%)	3,4		28,4	

Os resultados obtidos para a tensão no barramento da carga *u(t)* e para a corrente de alimentação do sistema i(t) são ilustrados na tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Composição harmônica calculada (caso 5)

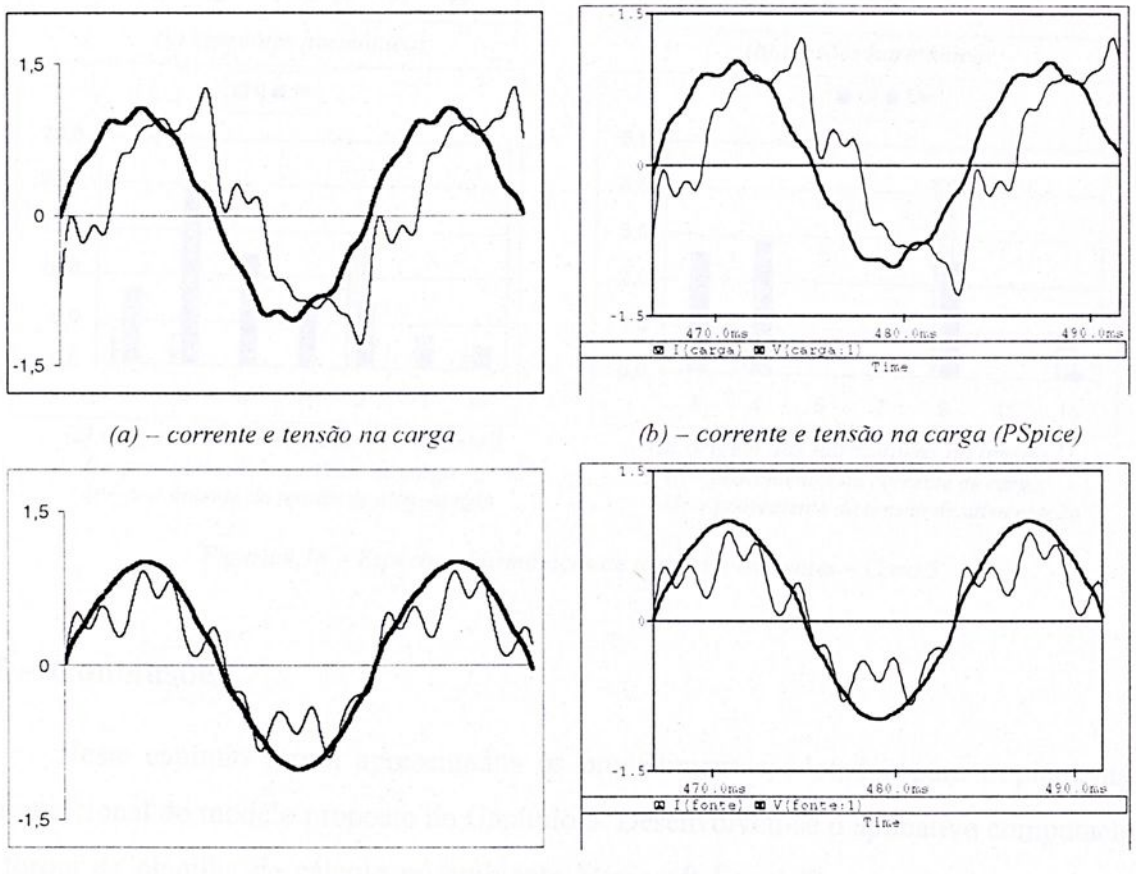
Ordem	Tensão na carga e Corrente de alimentação	
h	Módulo (% u_1)	Módulo (% I_1)
1	100,0	70,7
3	2,5	8,8
4	2,9	14,2
5	0,0	8,7
7	0,0	5,0
9	5,0	14,8
11	0,0	2,6
13	0,8	3,1
DHT (%)	6,4	24,8

Constatações: A exemplo do caso 4, a degradação do desempenho da filtragem também é proveniente de duas origens, a distorção da tensão do sistema de alimentação e da corrente da carga. Destaca-se que a inclusão das harmônicas pares, embora sejam de baixas amplitudes e dentro dos limites fixados pela norma IEEE 519, promove um aumento significativo na distorção total da corrente de alimentação e da tensão na carga. Observando-se as figuras 4.2, 4.3 e 4.4, verifica-se que o sistema de filtragem apresenta uma ressonância próxima à freqüência harmônica injetada, resultando em valores elevados das transmitâncias. Isto faz com que os efeitos das componentes de 4ª ordem

unesp

sejam refletidos de forma amplificada, resultando em distorções individuais que violam os limites estabelecidos pela norma e contribuem para o aumento das distorções totais da corrente de alimentação e da tensão na carga.

A tensões e correntes envolvidas neste caso são ilustradas na figura 4.17.



(a) – corrente e tensão na carga

(b) – corrente e tensão na carga (PSpice)

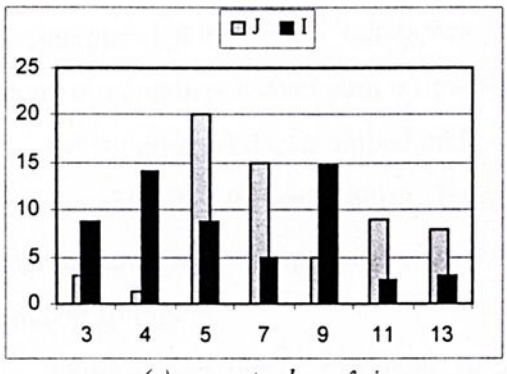
(c) – corrente e tensão de alimentação

(d) – corrente e tensão no sistema (Pspice)

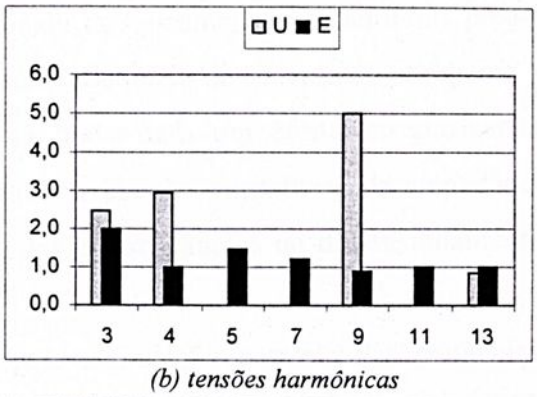
Figura 4.17 – Resultados Simulados - Caso 5

—Tensões —Correntes

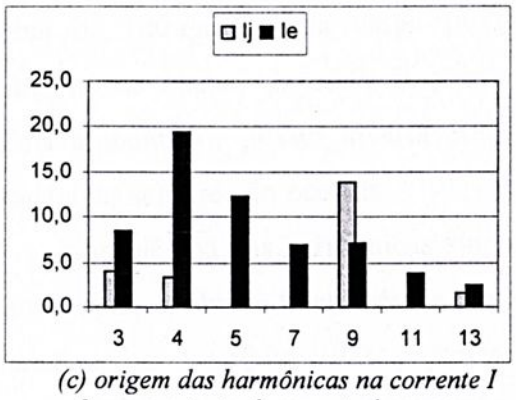
A figura 4.18 apresenta o espectro de amplitude das tensões e correntes, bem como as contribuições específicas de cada fonte harmônica.



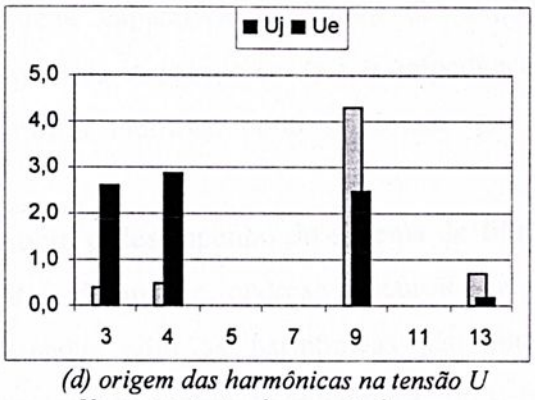
(a) correntes harmônicas



(b) tensões harmônicas



(c) origem das harmônicas na corrente I
Ij – provenientes da corrente de carga
Ie – proveniente da tensão de alimentação



(d) origem das harmônicas na tensão U
Uj – provenientes da corrente de carga
Ue – proveniente da tensão de alimentação

Figura 4.18 – Espectros harmônicos de tensões e correntes – Caso 5

4.5 – Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os procedimentos adotados para implementação computacional do modelo proposto no Capítulo 3. Desenvolveu-se o aplicativo computacional na forma de planilha de cálculo no ambiente Microsoft Excel ®, por ser um ambiente de programação muito flexível, com ampla biblioteca de funções pré-programadas e extensivamente utilizado em aplicações afins.

Paralelamente, utilizou-se também o programa de simulação comercial *Orcad-Pspice®* da *Cadence Design Systems* para validação das simulações apresentadas. Os resultados obtidos com o uso dos dois programas mostraram-se compatíveis e asseguraram o uso da metodologia proposta dentro dos objetivos propostos neste trabalho.

Pela análise do comportamento das transmitâncias associadas ao sistema de filtragem, constatou-se uma grande sensibilidade com respeito às variações da impedância do sistema alimentador. Um acréscimo no nível de curto-circuito promove o deslocamento de todas as ressonâncias em direção às freqüências de maior amplitude. Isto reduz a sensibilidade do filtro para algumas ordens harmônicas e aumenta para outras. Conclui-se, portanto, que o

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

conhecimento detalhado das condições operacionais do sistema alimentador no ponto de acoplamento é indispensável para o dimensionamento adequado do sistema de filtragem.

Em contrapartida, a impedância da carga linear tem um efeito insignificante no comportamento das transmitâncias. Para isto, uma avaliação superficial da impedância é suficiente para uma boa aproximação no cálculo das transmitâncias no dimensionamento do sistema de filtragem.

Observou-se que a reatância composta pela associação paralela das reatâncias do sistema de filtragem e da carga possui natureza capacitiva na banda de freqüência imediatamente abaixo de cada freqüência de sintonia. Sabendo-se que a impedância do sistema alimentador possui invariavelmente natureza indutiva, pode-se afirmar que essas ressonâncias sempre vão ocorrer.

A influência das harmônicas singulares sobre o desempenho do sistema de filtragem foi investigada e ilustrada através de cinco cenários de análise, onde se procurou evidenciar separadamente os efeitos das parcelas relacionadas com as harmônicas não filtradas, denominadas remanescentes e das harmônicas presentes na tensão de alimentação do sistema.

Adotou-se um sistema de filtragem com três braços sintonizados para as harmônicas de 5^a, 7^a e 11^a ordens. Como fonte harmônica, considerou-se um espectro típico de conversor de seis pulsos, limitado até a 13^a ordem. Inicialmente a tensão de alimentação foi admitida livre de distorções harmônicas e portanto apenas uma ordem harmônica remanescente foi considerada. Observou-se que o sistema de filtragem reduziu substancialmente a distorção da corrente de alimentação de 27,6% para 1,51% e a distorção da tensão do barramento da carga ficou limitada a 0,66%, atendendo todos a os itens da norma IEEE 519.

Na seqüência, foram acrescentadas gradativamente outras ordens harmônicas remanescentes, bem como distorções na tensão de alimentação do sistema objetivando observar a degradação do desempenho do sistema de filtragem. As harmônicas singulares localizadas nas bandas de freqüências ressonantes são substancialmente amplificadas, comprometendo a eficácia do sistema de filtragem. Nos exemplos analisados, mesmo considerando os espectros harmônicos da corrente da carga e da tensão de alimentação dentro dos limites individuais e totais estabelecidos pela norma IEEE 519, muitos dos limites foram violados na corrente total de alimentação e na tensão da carga.

Os resultados obtidos demonstram a importância de estudos detalhados sobre as características das respostas em freqüência do sistema formado pelo sistema de filtragem, carga e sistema alimentador. O método de análise das transmitâncias adotado mostrou-se confiável e adequado para identificação das principais causas da deterioração da filtragem.

CAPÍTULO 5

Diretrizes Para o Dimensionamento Otimizado

5.1 – Introdução

O dimensionamento dos sistemas de filtragem passiva pode ser um processo muito exaustivo, sendo recomendável o uso de programas computacionais especializados [49], [50]. De um modo geral, o dimensionamento do sistema de filtragem consiste de diversas etapas. Inicialmente um grande número de informações relativas ao cenário onde se pretende instalar o sistema de filtragem devem ser reunidas, destacando-se o conhecimento detalhado do sistema alimentador no PAC, as distorções harmônicas produzidas pelas cargas não-lineares, a distorção harmônica na tensão de alimentação e a potência reativa a ser compensada. Na seqüência, baseado no espectro e nas amplitudes das harmônicas a serem filtradas, define-se um arranjo preliminar do sistema de filtragem, ou seja, o número de braços sintonizados e suas respectivas freqüências de sintonia, que normalmente são fixadas para as ordens harmônicas predominantes. Em uma etapa posterior, procede-se o cálculo e o ajuste dos parâmetros dos filtros, ou seja, das indutâncias, capacitâncias e do fator de qualidade do reator. Nesta etapa, vários fatores podem ser considerados na busca de soluções que promovam o melhor desempenho o sistema de filtragem.

Como a maioria das instalações necessita de compensação reativa, cada braço sintonizado pode prover parte da energia reativa, pois sua característica é capacitiva à freqüência industrial. Neste contexto, um importante aspecto a ser avaliado é a distribuição da potência reativa de compensação entre os braços do sistema de filtragem. A escolha das proporções relativas das capacitâncias dos vários filtros sintonizados usualmente consiste de um procedimento de tentativa

e erro, buscando obter, por exemplo, a menor distorção harmônica total residual e/ou o menor custo da instalação [51], [52], [53].

Por outro lado, o efeito das distorções da tensão de alimentação no desempenho da filtragem pode ser reduzido deslocando-se ligeiramente as freqüências de sintonia dos diferentes braços, ou seja, dessintonizando os circuitos ressonantes das freqüências nocivas. Se, por um lado, a dessintonia favorece a minimização de alguns efeitos provenientes da distorção harmônica na tensão de alimentação, por outro compromete a eficiência da filtragem para as mesmas freqüências da corrente de carga. Este procedimento também suscita a utilização de métodos baseados em tentativa e erro no sentido de estabelecer um compromisso entre as ações desejadas, objetivando o melhor resultado global [49].

Neste capítulo, apresenta-se uma metodologia alternativa baseada em critérios de otimização para definição dos ajustes nos parâmetros do sistema de filtragem. Neste contexto, várias opções de otimização podem ser consideradas, como, por exemplo, minimizar as perdas de potência ativa causadas pelas harmônicas geradas pelas cargas, minimizar as distorções harmônicas relacionadas com efeitos prejudiciais aos equipamentos e sistemas, minimizar o custo global da instalação de filtragem, entre outras. Infelizmente, tais tarefas são difíceis de traduzir em medidas quantitativas para o projeto do filtro e também não são equivalentes. Portanto, esta é uma ambigüidade justificada na literatura com respeito a escolha dos critérios de otimização para um projeto de filtro. Entretanto, a escolha do critério de otimização pode ser direcionada para atender a uma situação específica de cada projeto [44], [45], [49], [50].

No processo de otimização apresentado neste trabalho, o objetivo está direcionado para a melhoria do desempenho do sistema de filtragem com respeito à minimização dos níveis de distorção harmônica causadas pelas harmônicas singulares.

A implementação prática do procedimento de otimização pode ser realizada através de modelagens detalhadas do sistema de alimentação, dos filtros e da carga. Como o método de otimização pode envolver um grande número de iterações, utilizar este tipo de modelo expandido pode ser computacionalmente ineficaz. Neste trabalho, optou-se pela utilização do modelo simplificado do sistema baseado nos valores aproximados das transmitâncias, apresentado nos capítulos anteriores, para a implementação dos procedimentos de otimização. As diretrizes para o dimensionamento do sistema de filtragem são definidas mantendo-se um compromisso entre a qualidade dos resultados obtidos e a substancial diminuição do tempo de simulação [44], [45].

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

5.2 – Alteração das Transmitâncias do Sistema de Filtragem

A eficácia do sistema de filtragem pode ser melhorada através de mudanças nas capacitâncias e indutâncias dos diferentes braços sintonizados. Como visto nos capítulos anteriores, estas grandezas, em conjunto com as impedâncias da carga e do sistema, definem quatro transmitâncias que caracterizam o desempenho do sistema de filtragem.

Existe um grande número de possibilidades para modificações nas transmitâncias do filtro, que podem ser aplicadas separadamente ou combinadas, no sentido de se obter um melhor desempenho do sistema de filtragem, frente a degradação associada à presença de harmônicas singulares [44], [45], [49]. Neste trabalho, entre as possibilidades que não representam alterações topológicas, ou seja, não são consideradas aplicações de arranjos alternativos de filtros passivos, tais como filtros amortecidos e filtros passa-alta, foram investigadas:

- sobre ou sub-compensação da potência reativa da carga;
- alteração da potência reativa alocada por braço;
- dessintonia das freqüências de ressonâncias.

5.2.1 - Sobre ou Sub-Compensação da Potência Reativa

Uma alteração no nível de compensação da potência reativa significa uma mudança nas capacitâncias e, conseqüentemente, das reatâncias de todos os braços do sistema de filtragem. Foi tomado como referência o sistema utilizado no capítulo 4 deste trabalho, e admitiu-se que o nível de compensação da potência reativa foi reduzido pela metade (NC=50%). As figuras 5.1 e 5.2 apresentam os resultados obtidos para a variação da reatância $X_{a\omega}$ e da impedância do sistema alimentador Z_s com a freqüência, para os diferentes níveis de compensação (NC) investigados.

unesp

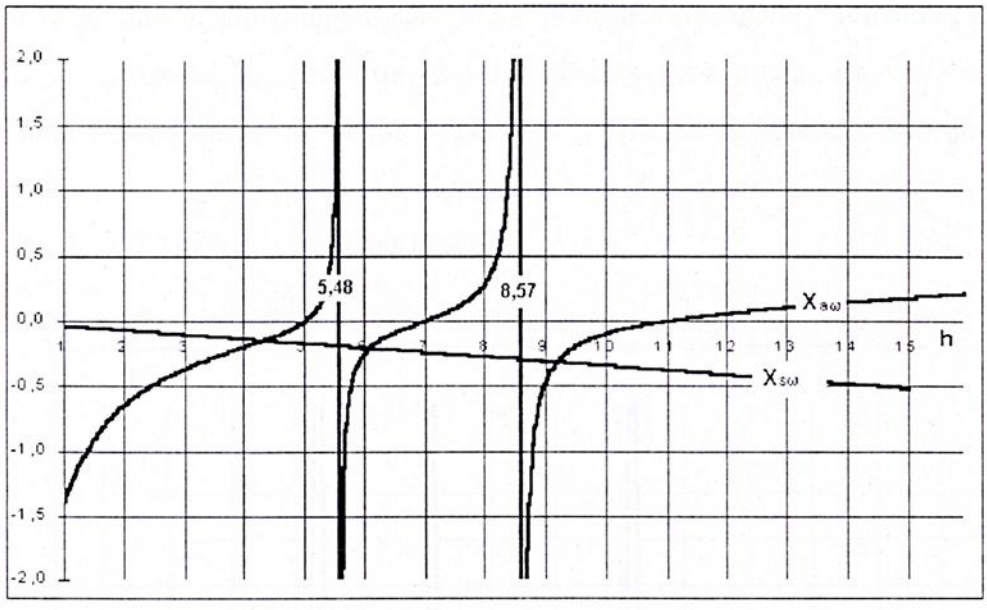


Figura 5.1- Reatâncias $X_{a\omega}$ e $-X_{s\omega}$ para S_{cc}=28,4, X/R=5, FD=0,71, NC=100%, Q=50, Sl=1pu.

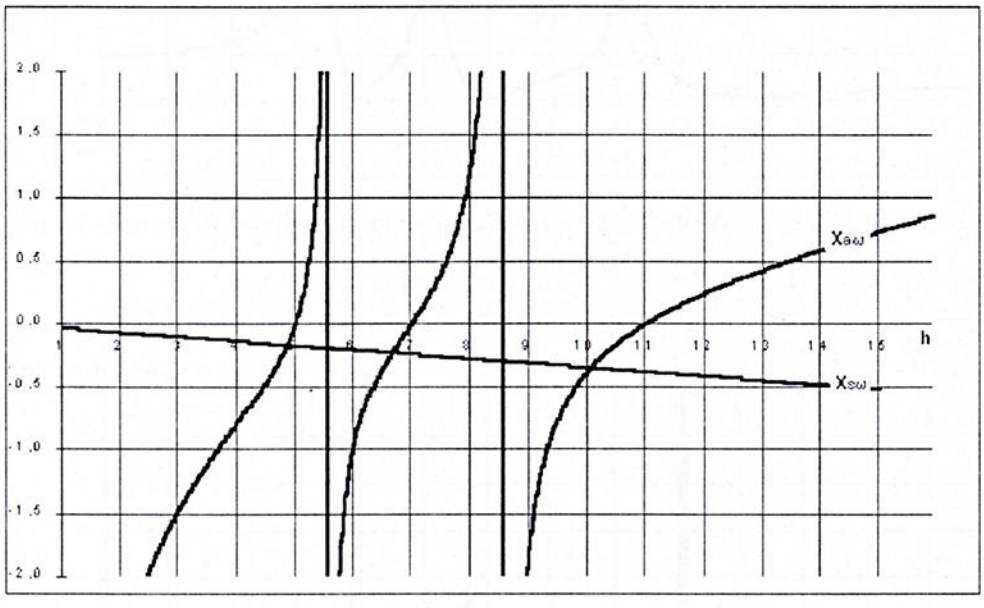


Figura 5.2 - Reatâncias $X_{a\omega}$ e $-X_{s\omega}$ para S_{cc}=28,4, X/R=5, FD=0,71, NC=50%, Q=50, Sl=1pu.

Nas figuras, as freqüências de sintonia dos braços são identificadas pelos cruzamentos da curva característica de $X_{a\omega}$ com o eixo das freqüências. Por outro lado, as freqüências de ressonância do sistema de filtragem com o sistema alimentador são identificadas pelo cruzamento das duas curvas características.

Observa-se que a sub-compensação afeta praticamente apenas a inclinação da curva característica da reatância $X_{a\omega}$ em torno das freqüências de sintonia, isto é, sua inclinação aumenta. Como conseqüência, as ressonâncias com o sistema alimentador são deslocadas no sentido crescente das freqüências. As figuras 5.3 e 5.4 ilustram o comportamento das transmitâncias A_ω e B_ω para as condições descritas.

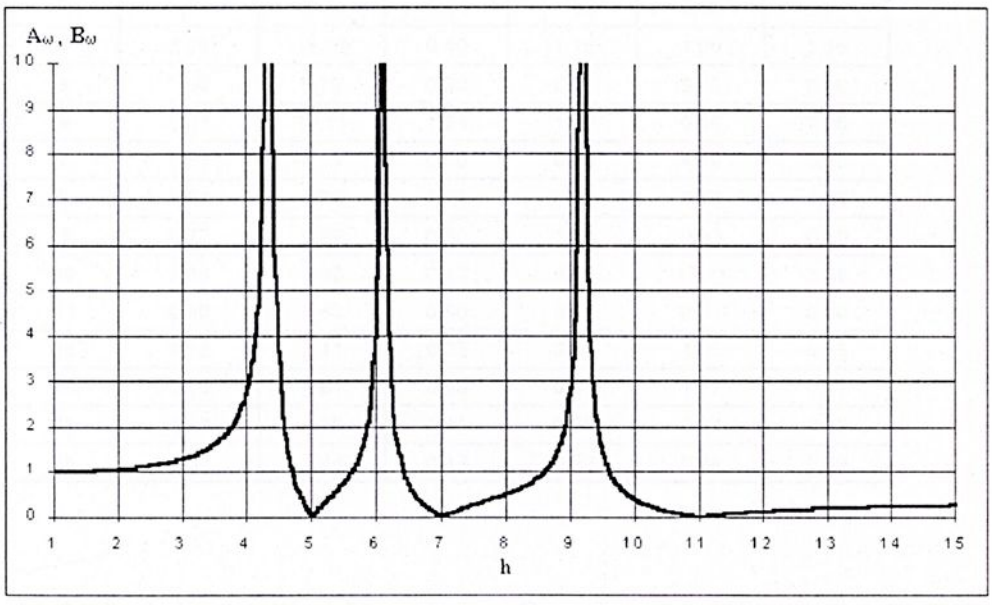


Figura 5.3 -Transmitâncias A_ω e B_ω para S_{cc}=28,4, X/R=5, FD=0,71, NC=100%, Q=50, Sl=1pu.

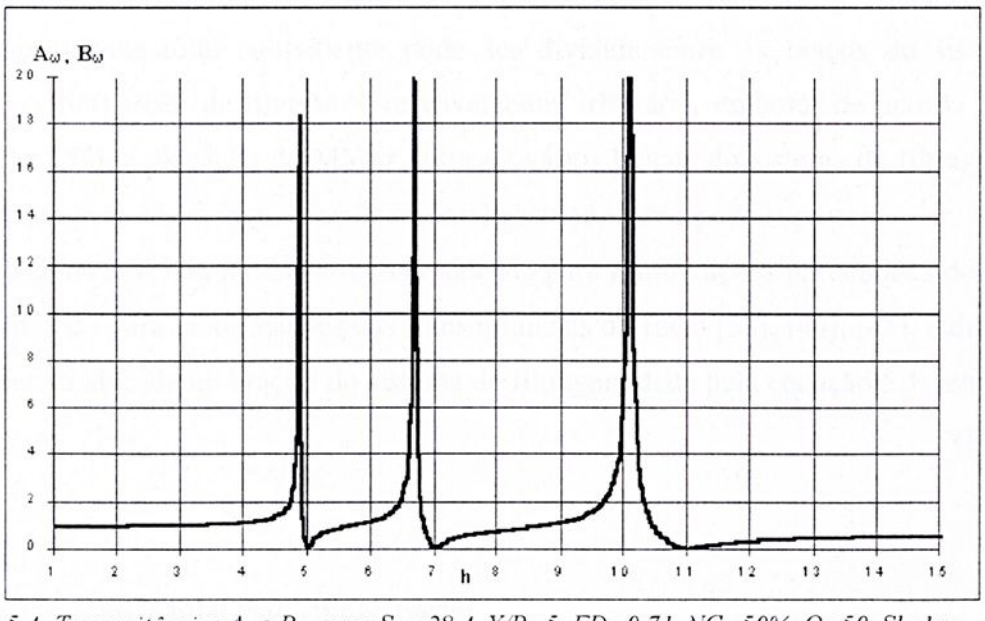


Figura 5.4 -Transmitâncias A_ω e B_ω para S_{cc}=28,4, X/R=5, FD=0,71, NC=50%, Q=50, Sl=1pu.

Desta forma, a sensibilidade do sistema de filtragem pode ser substancialmente alterada para determinadas ordens harmônicas, como ilustrado na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Transmitâncias harmônicas para diferentes níveis de compensação reativa.

h	Nível de compensação 100%			Nível de compensação 50%		
	A_h / B_h	Y_{xh}	Z_{yh}	A_h / B_h	Y_{xh}	Z_{yh}
2	1,07	1,10	0,07	0,99	0,33	0,07
3	1,31	3,02	0,14	1,03	0,30	0,11
4	2,88	13,68	0,40	1,15	1,08	0,16
5	0,00	5,79	0,00	0,00	5,79	0,00
6	5,03	19,51	1,04	1,20	0,96	0,25
7	0,00	4,14	0,00	0,00	4,14	0,00
8	0,51	1,79	0,14	0,78	0,79	0,22
9	2,77	5,69	0,86	1,14	0,45	0,35
10	2,88	4,02	0,13	6,89	17,11	2,38
11	0,00	2,63	0,00	0,00	2,63	0,00
12	0,12	2,11	0,05	0,36	1,55	0,15
13	0,19	1,81	0,08	0,47	1,17	0,21
14	0,23	1,60	0,11	0,53	0,97	0,26
15	0,52	1,44	0,13	0,22	0,84	0,29

5.2.2 – Alteração da Potência Reativa Alocada por Braço

Após o dimensionamento do banco de capacitores com respeito a potência reativa requerida, a capacitância total equivalente pode ser dividida entre os braços do sistema de filtragem [50]. A proporção da divisão é relativamente arbitrária, embora, de acordo com as referências [52] e [53], a alocação de MVAr entre os vários braços do sistema de filtragem seja baseada na porcentagem de corrente harmônica total que cada ramo pode suportar.

A mudança no nível da potência reativa alocada para ramificações particulares do filtro é o mais efetivo método para modificações das transmitâncias do filtro [53], [44], [45]. Admitindo-se a potência reativa alocada no braço *i* do sistema de filtragem dada pela equação 5.1, tem-se:

$$\underline{Q}_i = k_i \underline{Q} \tag{5.1}$$

Sendo: $0 \leq k_i \leq 1$;

$\underline{Q}$ - potência reativa total para compensação.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

Considerando-se o circuito equivalente ilustrado na figura 5.5, e sabendo-se que o braço i do sistema de filtragem é sintonizado na ordem harmônica h, o ramo sintonizado na ordem harmônica h_i, a capacitância C_i associada à potência reativa Q_i pode ser determinada por:

$$k_i Q = \frac{U^2}{X_{a\omega}} \tag{5.2}$$

Sendo: U – valor eficaz da tensão no barramento da carga.

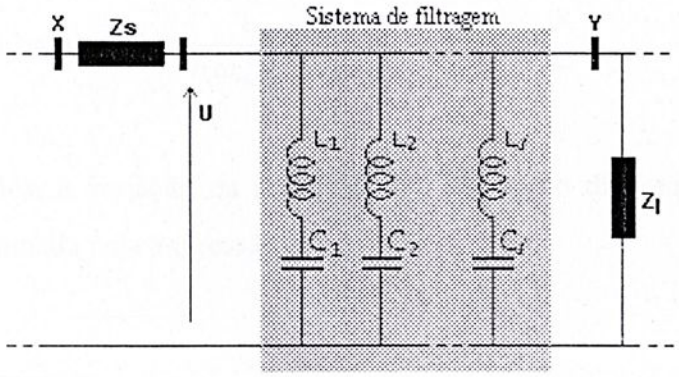


Figura 5.5 –Impedâncias do sistema equivalente.

A reatância equivalente do braço *i* na freqüência da rede é dada por:

$$X_i = \omega_{rede} L_i - \frac{1}{\omega_{rede} C_i} \tag{5.3}$$

Para a ordem harmônica de sintonia, tem-se:

$$h_i \omega_{rede} L_i = \frac{1}{h_i \omega_{rede} C_i} \tag{5.4}$$

Sendo: h_i - harmônica de sintonia do braço i;

$\omega_{rede} = 2\pi f$;

f - freqüência da rede.

Das expressões 5.2, 5.3 e 5.4, obtém-se a expressão 5.5 para determinação da capacitância alocada no braço *i*.

$$C_i = k_i \frac{Q}{\omega_{rede} U^2} \left(1 - \frac{1}{h_i^2} \right) \tag{5.5}$$

Como visto nos capítulos anteriores, a reatância total $X_{a\omega}$ é dada pela associação paralela das reatâncias de cada braço sintonizado e da carga, conforme mostrado na figura 5.5. Em torno da freqüência de sintonia h_i de um braço específico i, esta reatância pode ser aproximada pela reatância equivalente deste braço, conforme equação 5.6.

$$X_{a\omega}(h_i) \cong X_i(h_i) = h_i \omega_{rede} L_i - \frac{1}{h_i \omega_{rede} C_i} \tag{5.6}$$

Nestas condições, a variação da reatância $X_{a\omega}$ em torno da freqüência de sintonia do braço i pode ser determinada pela expressão 5.7.

$$\frac{dX_{a\omega}}{d\omega}\Big|_{\omega=\omega_i} = \frac{2}{h_i^2 \omega_{rede}^2 C_i} \tag{5.7}$$

Substituindo-se 5.5 em 5.7, obtém-se a expressão 5.8.

$$\frac{dX_{a\omega}}{d\omega}\Big|_{\omega=\omega_i} = \frac{2U^2}{\omega_{rede}(h_i^2 - 1)} \frac{1}{k_i Q} \tag{5.8}$$

Observa-se pela equação 5.8, que a taxa de variação da reatância equivalente em torno da freqüência de sintonia de cada braço é inversamente proporcional a quantidade de reativos alocados nos respectivos braços. Desta forma, esta taxa diminui com o aumento da potência reativa alocada no braço, ou seja, com a capacitância do braço C_i. Uma redução na inclinação da reatância altera isoladamente as freqüências das ressonâncias paralelas em torno da freqüência de sintonia do ramo com a potência reativa aumentada, bem como as freqüências das ressonâncias série com a reatância do sistema de distribuição X_s. Comparando-se as figuras 5.1 e 5.6, é possível identificar as variações citadas. A figura 5.6 mostra a variação de $X_{a\omega}$ em função da freqüência para o filtro com 70% de potência reativa de compensação alocada para o braço

sintonizado para a 7ª ordem harmônica, 20% no braço de 5ª ordem e 10% no braço de 11ª ordem . Em torno da 7ª harmônica observa-se uma diminuição da inclinação devido ao aumento de k_7, de 0,33 para 0,7. Em torno da 5ª harmônica ocorre um pequeno aumento da inclinação decorrente da alteração de k_5, de 0,33 para 0,2. O mesmo acontece em torno da 11ª harmônica, onde se observa um aumento significativo da inclinação de $X_{a\omega}$, uma vez que k_{11} foi reduzido para menos de um terço do seu valor original.

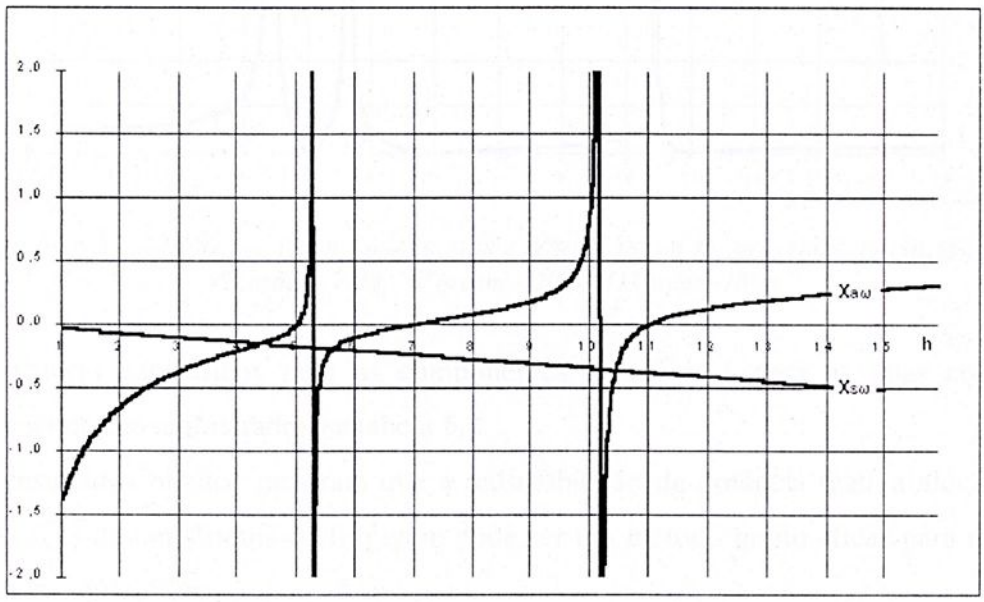


Figura 5.6 - Reatâncias $X_{a\omega}$ e $-X_{s\omega}$ para S_{cc}=28,4, X/R=5, FD=0,71, NC=100%, Q=50, Sl=1pu. (7ª ordem- 70%, 5ª ordem – 20%, 11ª ordem-10%)

O comportamento das magnitudes das transmitâncias para esta nova distribuição da potência reativa entre os três braços de filtragem é ilustrado na figura 5.7. As diferenças entre as transmitâncias para uma distribuição eqüitativa da potência reativa e para esta nova distribuição podem ser visualizadas comparando-se as figuras 5.3 e 5.7.

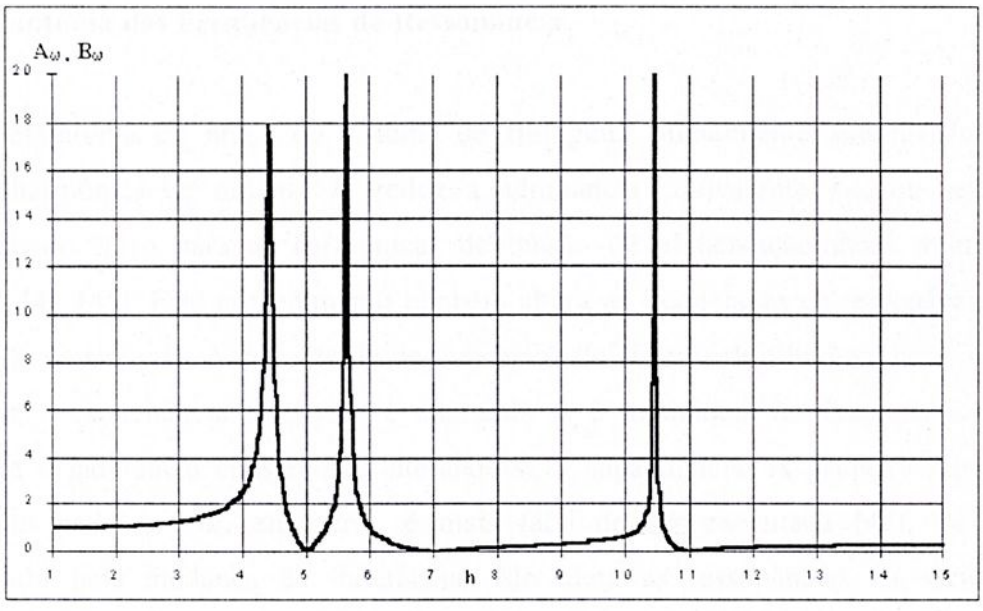


Figura 5.7 -Transmitâncias A_ω e B_ω para S_{cc}=28,4, X/R=5, FD=0,71, NC=100%, Q=50, Sl=1pu. (7ª ordem- 70%, 5ª ordem – 20%, 11ª ordem-10%)

Os valores específicos para as componentes harmônicas para as duas configurações analisadas encontram-se ilustrados na tabela 5.2.

Os resultados obtidos mostram que a redistribuição da potência reativa alocada para os diferentes braços de um sistema de filtragem pode ser um método muito eficaz para modificação das transmitâncias do filtro.

Tabela 5.2 – Transmitâncias harmônicas para diferentes distribuições da compensação reativa.

h	(7ª)-33,3%	(5ª)-33.3%	(11ª)-33.3%	(7ª)-70%	(5ª)-20%	(11ª)-10%
	A_h / B_h	Y_{xh}	Z_{yh}	A_h / B_h	Y_{xh}	Z_{yh}
2	1,07	1,10	0,07	1,07	1,10	0,07
3	1,31	3,02	0,14	1,31	2,98	0,14
4	2,88	13,68	0,40	2,61	11,69	0,36
5	0,00	5,79	0,00	0,00	5,79	0,00
6	5,03	19,51	1,04	1,01	9,69	0,21
7	0,00	4,14	0,00	0,00	4,14	0,00
8	0,51	1,79	0,14	0,22	2,81	0,06
9	2,77	5,69	0,86	0,36	2,04	0,11
10	2,88	4,02	0,13	0,69	0,89	0,24
11	0,00	2,63	0,00	0,00	2,63	0,00
12	0,12	2,11	0,05	0,23	1,85	0,10
13	0,19	1,81	0,08	0,29	1,57	0,13
14	0,23	1,60	0,11	0,33	1,39	0,16
15	0,52	1,44	0,13	0,43	1,26	0,18

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

5.2.3 – Dessintonia das Freqüências de Ressonância

A dessintonia do braço do sistema de filtragem, inicialmente sintonizado para uma freqüência harmônica de ordem h, reduz a admitância equivalente Y_{xh}, ou seja, reduz a sensibilidade do filtro para as harmônicas de tensão de alimentação desta mesma ordem harmônica [44], [45]. Este procedimento também altera as freqüências de ressonância em torno da freqüência de sintonia. A dessintonia de um braço do sistema de filtragem pode ser efetuada mantendo-se a capacitância constante e alterando-se a indutância do braço considerado, ou mantendo-se a indutância constante e alterando-se a capacitância. A primeira hipótese é um procedimento padrão, pois, em geral, é mais fácil de ser executada [45]. Se o filtro é dessintonizado pela mudança da indutância, isto afeta as ressonâncias na vizinhança das freqüências de sintonia, conforme mostra a figura 5.8.

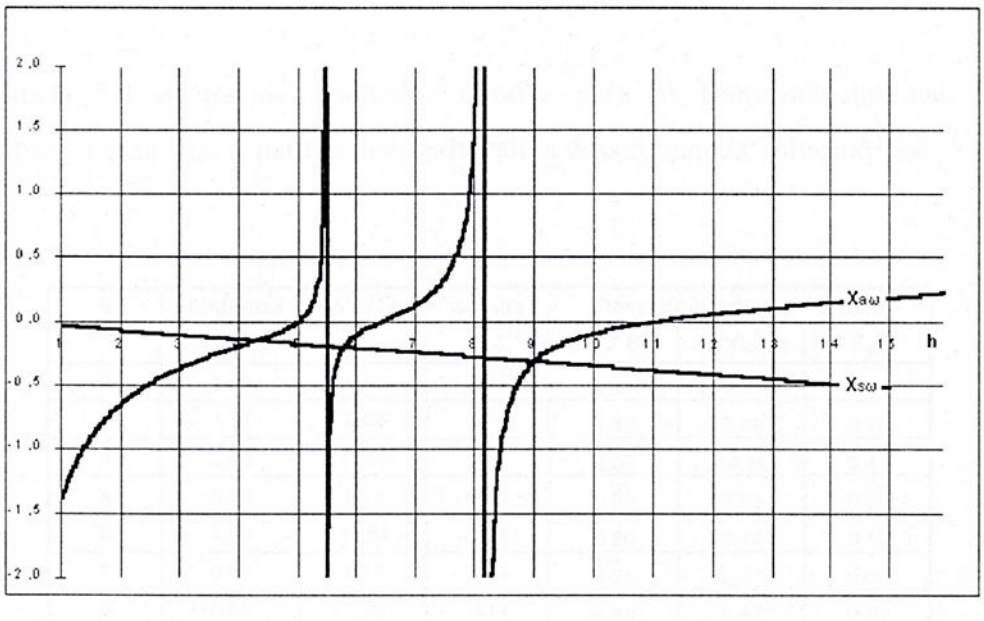


Figura 5.8 - Reatâncias $X_{a\omega}$ e $-X_{s\omega}$ com o filtro de 7ª ordem harmônica dessintonizado em 4 Hz para S_{sc}=25, X/R=5, FP=0.7, nível compensação=100% e fator de qualidade Q=50.

A figura 5.9 ilustra os resultados obtidos para as transmitâncias A_ω e B_ω, com o filtro de 7ª ordem dessintonizado em 4 Hz, isto é, para 6,6 ω_{rede}. Isto move a ressonância série com a reatância do sistema alimentador na vizinhança superior à freqüência de sintonia para a 9ª harmônica e a ressonância série na vizinhança inferior para 5,7 ω_{rede}.

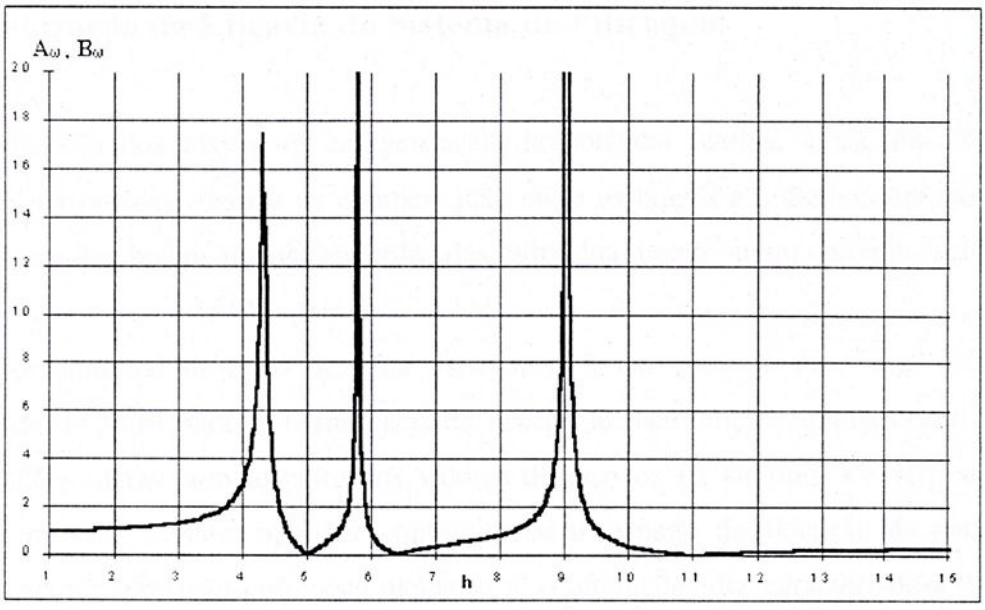


Figura 5.9 - Transmitâncias A_ω e B_ω com o filtro de 7ª ordem harmônica dessintonizado em 4 Hz para S_{sc}=25, X/R=5, FP=0.7, nível compensação=100% e fator de qualidade Q=50.

A tabela 5.3 ilustra os resultados obtidos para as transmitâncias nas freqüências harmônicas para o caso base e para caso envolvendo a dessintonia da 7ª harmônica.

Tabela 5.3 – Transmitâncias harmônicas para dessintonia na 7ª ordem harmônica.

H	Sintonias em 5ª, 7ª e 11ª ordens			Dessintonizado na 7ª ordem		
	A_h / B_h	Y_{xh}	Z_{yh}	A_h / B_h	Y_{xh}	Z_{yh}
2	1,07	1,10	0,07	1,07	1,11	0,07
3	1,31	3,02	0,14	1,32	3,08	0,14
4	2,88	13,68	0,40	3,05	14,96	0,42
5	0,00	5,79	0,00	0,00	5,79	0,00
6	5,03	19,51	1,04	0,90	9,14	0,19
7	0,00	4,14	0,00	0,35	2,67	0,09
8	0,51	1,79	0,14	0,83	0,61	0,23
9	2,77	5,69	0,86	26,01	81,44	8,09
10	2,88	4,02	0,13	0,36	3,93	0,12
11	0,00	2,63	0,00	0,00	2,63	0,00
12	0,12	2,11	0,05	0,13	2,11	0,05
13	0,19	1,81	0,08	0,19	1,80	0,09
14	0,23	1,60	0,11	0,23	1,58	0,11
15	0,52	1,44	0,13	0,51	1,42	0,14

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

5.3 – Otimização da Eficácia do Sistema de Filtragem

A fixação dos níveis de compensação da potência reativa, a escolha do critério de distribuição da potência reativa de compensação entre os braços e a dessintonia das freqüências de ressonância dos braços podem ser utilizadas individualmente ou em conjunto para melhorar o desempenho do sistema de filtragem.

A dessintonia do filtro de uma harmônica é um procedimento que pode reduzir a sensibilidade do filtro para as harmônicas da tensão de distribuição. Infelizmente, não existem recomendações claras com respeito aos valores de desvios de sintonia a serem utilizados por braço. Além disso, existem opiniões contraditórias a respeito da alocação da potência reativa entre os braços e a relação entre esta alocação e as alterações das características do sistema de filtragem ainda é um processo pouco explorado [44], [45]. Consequentemente, mudanças nas indutâncias e capacitâncias do filtro objetivando a dessintonia, a alteração e redistribuição da potência reativa dos braços de um sistema de filtragem, são tratadas na literatura como uma espécie de aproximação experimental. Alguns resultados, visando a melhoria do desempenho da filtragem, são obtidos com base em simulações digitais envolvendo diferentes cenários e identificando a solução mais adequada. Este procedimento normalmente demanda muito tempo de simulação e análises e muitas vezes não apresenta resultados satisfatórios. Neste sentido, o uso de metodologias de otimização é uma alternativa interessante na busca não apenas de resultados satisfatórios, mas, sobretudo, dos melhores resultados decorrentes do uso dos procedimentos de modificação das transmitâncias citados anteriormente.

O desempenho do sistema de filtragem pode ser avaliado através dos coeficientes de distorção da corrente de alimentação, δ_i e a tensão no barramento, δ_u, estabelecidos no capítulo 3 deste trabalho. A minimização destes dois coeficientes pode ser considerada como o objetivo desta otimização. Desafortunadamente, essas duas questões não são equivalentes [45]. Para minimizar a distorção da tensão no barramento da carga, os braços do RHF devem ser sintonizados exatamente nas freqüências das harmônicas dominantes da corrente de carga. Entretanto, isto incrementa as harmônicas da corrente de alimentação causadas pelas harmônicas de mesma ordem na tensão de alimentação do sistema. Para minimizar a os efeitos desta distorção, os braços do filtro devem ser dessintonizados das freqüências harmônicas dominantes. Portanto, deve haver um compromisso entre a minimização das harmônicas da tensão no

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

barramento da carga e das harmônicas da corrente de alimentação. Este compromisso pode ser estabelecido baseado em requisitos de uma aplicação particular do sistema de filtragem [45]. O processo de otimização visa, então, a minimização da função descrita na equação 5.9, composta pelos coeficientes de distorção ponderados.

$$f(x) = PI.\delta_i + PT.\delta_u \tag{5.9}$$

Sendo: PI . fator de peso da distorção da corrente de alimentação;
PT- fator de peso da distorção da tensão do barramento.

Considerando-se todas as grandezas envolvidas no cálculo dos fatores de distorção verifica-se que a equação 5.9 depende dos parâmetros do sistema e dos espectros da corrente da carga e da tensão de alimentação. Dentro de um cenário de análise, os espectros citados, os parâmetros do sistema de alimentação e da carga são considerados invariantes e, portanto, não podem ser modificados no processo de otimização. Nestas condições, a equação 5.9 é função apenas das indutâncias e capacitâncias do sistema de filtragem, denotadas por x_k, na equação 5.10.

$$f(x) = f(x_1, x_2, ..., x_k, ...x_K) \tag{5.10}$$

A seguir apresentam-se alguns resultados colhidos neste trabalho a partir da implementação do processo de otimização proposto. A solução numérica de minimização da equação 5.9 é obtida com auxílio do aplicativo de otimização "SOLVER" disponível no ambiente de programação Microsoft® Excel 2000, [46], conforme mostrado no Apêndice.

5.3.1 – Caso Base

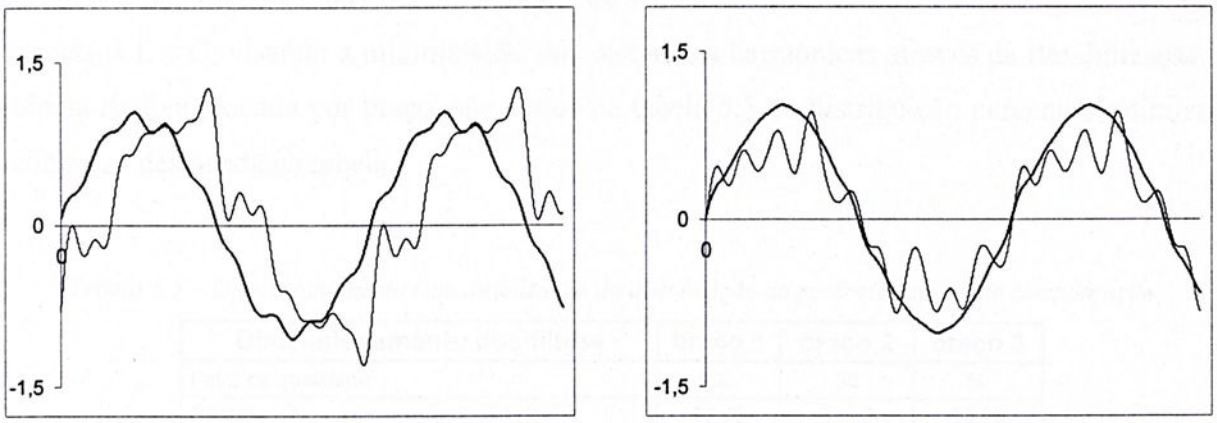
Inicialmente foi considerado um cenário baseado no sistema reduzido adotado no capítulo 4, admitindo-se a compensação total da potência reativa distribuída uniformemente entre os três braços do sistema de filtragem sintonizados para as ordens harmônicas 5ª, 7ª, e 11ª. O conteúdo harmônico injetado pela carga não-linear, bem como o conteúdo harmônico presente na tensão de alimentação do sistema são dados na tabela 5.4.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

Tabela 5.4 - Conteúdo harmônico injetado pela carga não-linear e conteúdo harmônico presente na tensão de alimentação do sistema.

Ordem	Tensão de alimentação (E)		Corrente na carga (J)	
H	Módulo (% e_1)	Fase (graus)	Módulo (% J_1)	Fase (graus)
1	100,0	0,0	100,0	-44,8
3	2,0	-30,0	3,0	0,0
5	1,5	0,0	20,0	0,0
6	0,3	0,0	2,0	0,0
7	1,2	0,0	15,0	-20,0
9	1,5	0,0	5,0	0,0
11	1,0	0,0	9,0	0,0
13	1,0	0,0	8,0	-45,0
DHT (%)	3,47	-	28,43	-

Os resultados para as correntes e tensões no tempo e os respectivos espectros harmônicos são ilustrados na figuras 5.10-a e 5.10-b, respectivamente.



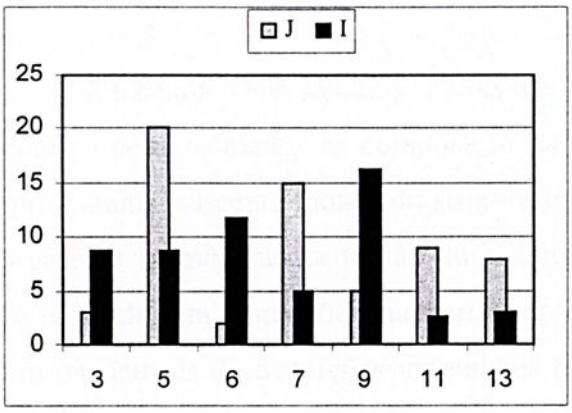
(a) Tensão e corrente na carga *(b) tensão e corrente no sistema de alimentação*

Figura 5.10 – Resultados Simulados - Caso base

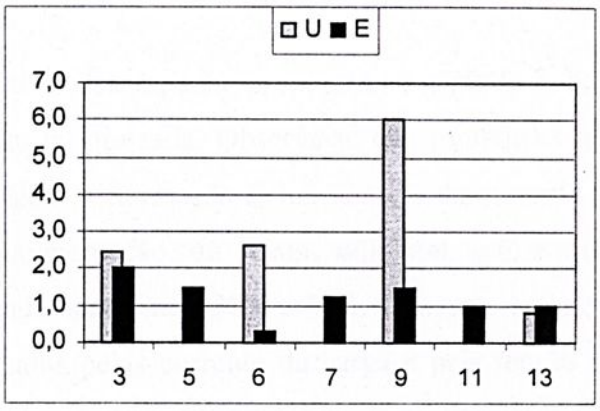
—Tensões —Correntes

Como visto nos capítulos anteriores, a presença de harmônicas singulares degrada o desempenho do sistema de filtragem e as distorções harmônicas nas correntes de alimentação e no barramento de carga ainda permanecem elevadas, devido principalmente a amplificação das harmônicas singulares de 3ª, 6ª e 9ª ordens, conforme ilustra a figura 5.11.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17



(a) correntes harmônicas



(b) tensões harmônicas

Figura 5.11 – Espectros harmônicos de tensões e correntes – Caso base

5.3.2 - Redistribuição Otimizada da Potência Reativa de Compensação

Neste item apresentam-se os resultados obtidos através do processo de otimização da distribuição da potência reativa entre os braço do sistema de filtragem. Os valores otimizados dos parâmetros L e C, visando a minimização das distorções harmônicas através da flexibilização da potência reativa alocada por braço, são dados na tabela 5.5. A distribuição percentual otimizada encontra-se destacada na tabela.

Tabela 5.5 – Dimensionamento com otimização da distribuição da potência reativa de compensação

Dimensionamento dos filtros	braço 1	braço 2	braço 3
Fator de qualidade	50	50	50
Contribuição para correção do Fd (%)	33,33	33,33	33,33
Ordem harmônica de sintonia original	5	7	11
Contribuição otimizada para correção do Fd (%)	**53,16**	**32,62**	**14,22**
Ordem harmônica dessintonizada	-	-	-
Potência reativa capacitiva (pu)	-0,374	-0,230	-0,100
Reatância capacitiva para a fundamental (pu)	2,671	4,353	9,989
Capacitancia (F)	9,93E-04	6,09E-04	2,66E-04
Reatância indutiva para a fundamental (pu)	0,107	0,089	0,083
Indutância (H)	2,83E-04	2,36E-04	2,19E-04
Resistência (pu)	5,67E-06	4,71E-06	4,38E-06

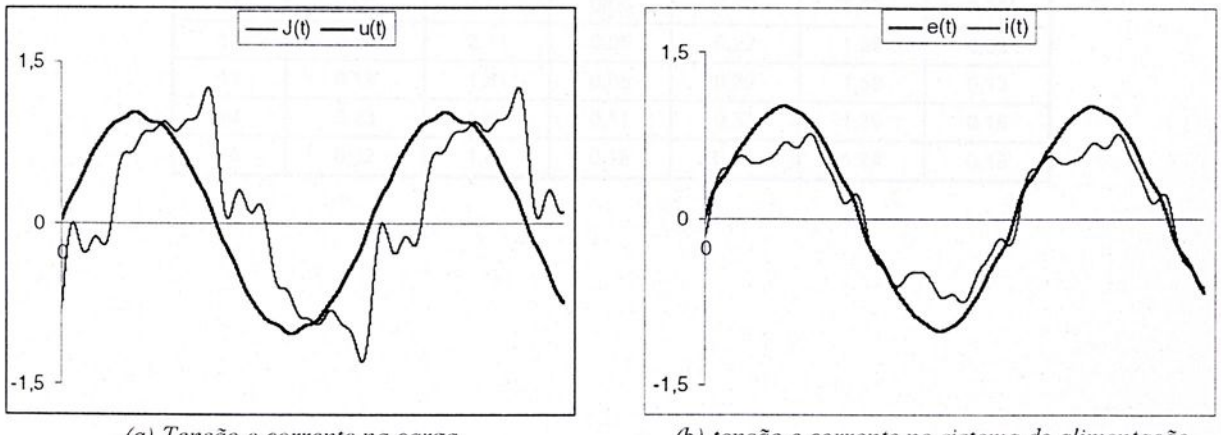
unesp

A tabela 5.6 apresenta os valores dos índices de desempenho propostos no capítulo 3, bem como os pesos adotados na composição da função minimizada. Observa-se que os índices que representam a susceptibilidade do sistema de filtragem com relação às harmônicas da corrente da carga e as harmônicas da tensão do sistema de alimentação, ou sejam, $\kappa i(j)$, $\kappa i(e)$, $\kappa u(j)$ e $\kappa u(e)$, são reduzidos em proporções que variam aproximadamente entre 30% e 70%. O mesmo acontece com os índices de distorções individuais produzidas pelas corrente da carga e pela tensão do sistema sobre a corrente de alimentação e a tensão da carga , $\delta i(j)$, $\delta i(e)$, $\delta u(j)$, $\delta u(e)$, representando efetivamente uma melhoria do desempenho do sistema de filtragem. As distorções totais são reduzidas de 24,4% para 15,2% na corrente de alimentação e de 7,1% para 3,2% na tensão da carga.

Tabela 5.6 – Índices de desempenho

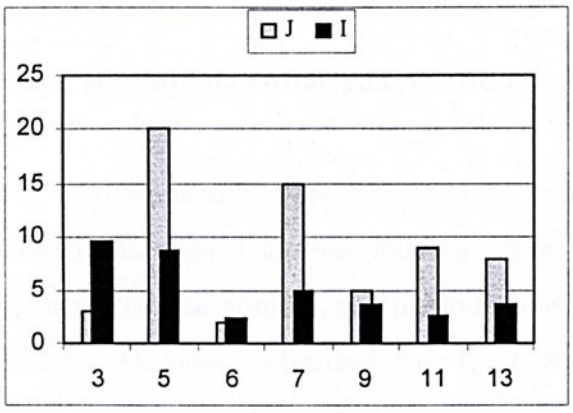
Critério de Otimização e Indices de Desempenho PT = 0,5 PI = 0,5			
Indice	Não Otimizado	Otimizado	Δ%
$\kappa i(j)$	0,6192	0,2121	65,7
$\kappa i(e)$	6,4945	5,1332	21,0
$\kappa u(j)$	1,3956	0,4449	68,1
$\kappa u(e)$	1,4807	0,8296	44,0
$\delta i(j)$	0,2479	0,0849	65,7
$\delta i(e)$	0,2243	0,1773	20,9
$\delta u(j)$	0,0484	0,0154	68,1
$\delta u(e)$	0,0514	0,0288	44,0
DIHT	0,2443	0,1517	37,9
DTHT	0,0707	0,0319	55,0

As figuras 5.12 e 5.13 apresentam as tensões e correntes no tempo, bem como seus respectivos espectros harmônicos.

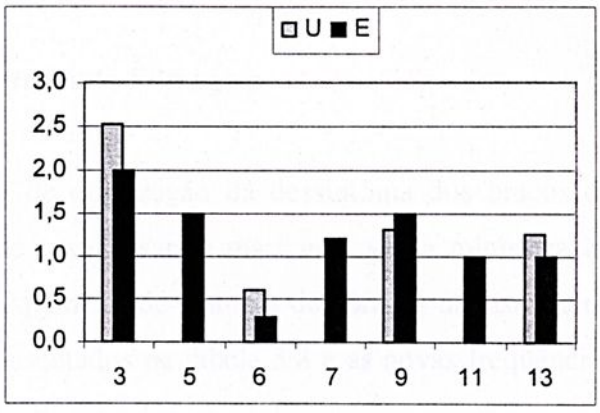


(a) Tensão e corrente na carga *(b) tensão e corrente no sistema de alimentação*

Figura 5.12 – Resultados simulados – Redistribuição otimizada da potência reativa



(a) correntes harmônicas



(b) tensões harmônicas

Figura 5.13 – Espectros harmônicos de tensões e correntes – Redistribuição otimizada da potência reativa

As transmitâncias calculadas para o caso em análise são apresentadas na tabela 5.7, onde se observa que a melhoria constatada no desempenho da filtragem se deve principalmente às alterações das transmitâncias para a 6ª e 9ª ordens harmônicas.

Tabela 5.7 – Transmitâncias harmônicas para redistribuição otimizada da potência reativa

h	Base			Redistribuição da potência reativa		
	A_h / B_h	Y_{xh}	Z_{yh}	A_h / B_h	Y_{xh}	Z_{yh}
2	1,07	1,10	0,07	1,07	1,15	0,07
3	1,31	3,02	0,14	1,35	3,37	0,14
4	2,88	13,67	0,40	4,43	25,04	0,61
5	0,00	5,79	0,00	0,00	5,79	0,00
6	**5,02**	**19,50**	**1,04**	**1,17**	**0,84**	**0,24**
7	0,00	4,14	0,00	0,00	4,14	0,00
8	0,51	1,79	0,14	0,36	2,31	0,10
9	**2,77**	**5,69**	**0,86**	**0,61**	**1,27**	**0,19**
10	0,39	4,02	0,13	3,99	8,67	1,38
11	0,00	2,63	0,00	0,00	2,63	0,00
12	0,12	2,11	0,05	0,22	1,89	0,09
13	0,19	1,81	0,08	0,29	1,58	0,13
14	0,23	1,60	0,11	0,33	1,39	0,16
15	0,52	1,44	0,13	0,43	1,24	0,18

unesp

5.3.3 - Dessintonia Otimizada dos Braços do Sistema de Filtragem

Os resultados obtidos através do processo de otimização da dessintonia dos braços de filtragem harmônica são discutidos a seguir. Neste caso, visando mais uma vez a minimização das distorções harmônicas, são flexibilizadas as freqüências de sintonia dos braços do sistema de filtragem. Os valores otimizados de L e C são apresentados na tabela 5.8 e as novas freqüências de sintonia, encontram-se em destaque.

Tabela 5.8 – Dimensionamento com dessintonia otimizada dos braços

Dimensionamento dos filtros	braço 1	braço 2	braço 3
Fator de qualidade	50	50	50
Contribuição para correção do Fd (%)	33,33	33,33	33,33
Ordem harmônica de sintonia original	5	7	11
Contribuição otimizada para correção do Fd (%)	-	-	-
Ordem harmônica dessintonizada	**4,97**	**7,34**	**11,98**
Potência reativa capacitiva (pu)	-0,235	-0,235	-0,235
Reatância capacitiva para a fundamental (pu)	4,260	4,260	4,260
Capacitancia (F)	6,23E-04	6,23E-04	6,23E-04
Reatância indutiva para a fundamental (pu)	0,172	0,079	0,030
Indutância (H)	4,58E-04	2,10E-04	7,88E-05
Resistência (pu)	9,15E-06	4,19E-06	1,58E-06

Os valores dos índices de desempenho são apresentados na tabela 5.9. Novamente constata-se uma redução de todos os índices em proporções significativas, que variam aproximadamente entre 25% e 50%. Neste caso, as distorções totais foram reduzidas de 24,4% para 16% na corrente de alimentação, e de 7,1% para 3,7% na tensão da carga.

Para este caso específico, verifica-se que os melhores resultados foram obtidos com a redistribuição da potência reativa de compensação. Destaca-se, contudo, que trata-se de uma situação muito particular e qualquer alteração, seja no espectro, na amplitude das harmônicas singulares ou, principalmente, no número de braços do sistema de filtragem, pode levar a resultados totalmente diferentes.

unesp

Tabela 5.9 – Índices de desempenho

Critério de Otimização e Indices de Desempenho			
PT = 0,5		PI = 0,5	
Indice	Não Otimizado	Otimizado	Δ%
κi(j)	0,6192	0,3194	48,4
κi(e)	6,4945	5,1907	26,3
κu(j)	1,3956	0,6404	54,1
κu(e)	1,4807	0,8785	42,5
δi(j)	0,2479	0,1279	48,4
δi(e)	0,2243	0,1792	26,3
δu(j)	0,0484	0,0222	54,1
δu(e)	0,0514	0,0305	42,5
DIHT	0,2443	0,1596	36,9
DTHT	0,0707	0,0371	48,2

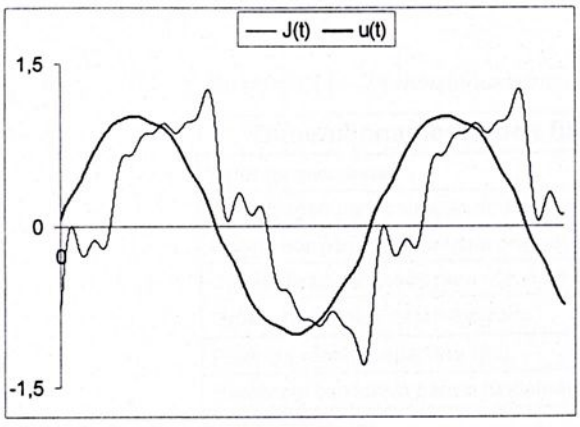
Observando-se as transmitâncias calculadas para este caso, que são apresentadas na tabela 5.10, conclui-se que a eficácia da filtragem foi aumentada devido, novamente, às alterações das transmitâncias para a 6ª e 9ª ordens harmônicas.

Tabela 5.10 – Transmitâncias harmônicas para redistribuição otimizada da potência reativa

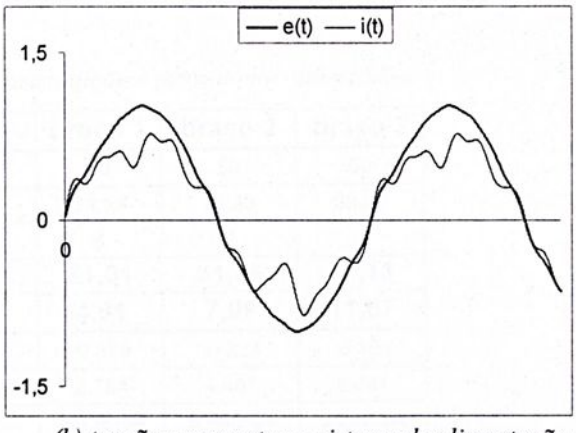
h	Base			Redistribuição da potência reativa		
	A_h / B_h	Y_{xh}	Z_{yh}	A_h / B_h	Y_{xh}	Z_{yh}
2	1,07	1,10	0,07	1,07	1,10	0,07
3	1,31	3,02	0,14	1,31	2,98	0,14
4	2,88	13,67	0,40	2,85	13,47	0,39
5	0,00	5,79	0,00	0,06	5,45	0,01
6	**5,02**	**19,50**	**1,04**	**2,39**	**6,74**	**0,50**
7	0,00	4,14	0,00	0,28	5,31	0,07
8	0,51	1,79	0,14	0,31	2,49	0,09
9	**2,77**	**5,69**	**0,86**	**0,88**	**0,38**	**0,27**
10	0,39	4,02	0,13	2,41	9,88	0,83
11	0,00	2,63	0,00	0,24	3,26	0,09
12	0,12	2,11	0,05	0,00	2,41	0,00
13	0,19	1,81	0,08	0,10	2,00	0,05
14	0,23	1,60	0,11	0,16	1,74	0,08
15	0,52	1,44	0,13	0,58	1,55	0,10

As figuras 5.14 e 5.15 ilustram as formas de onda das tensões e correntes e dos seus espetros harmônicos, respectivamente.

BCpIS - FEIS - UNESP



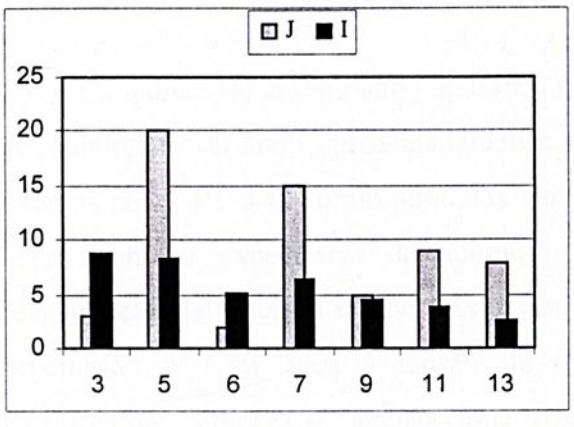
(a) Tensão e corrente na carga



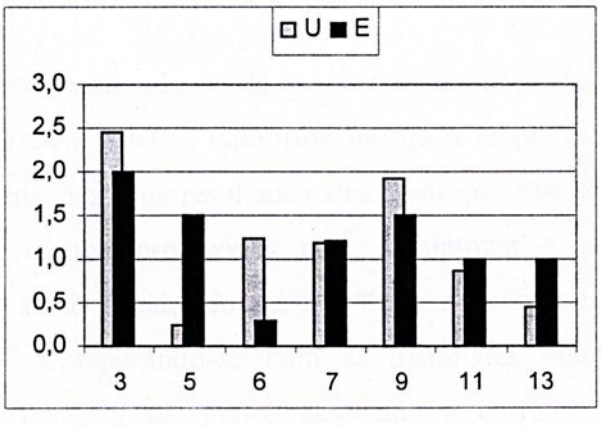
(b) tensão e corrente no sistema de alimentação

Figura 5.14– Resultados Simulados - Dessintonia otimizada

—Tensões —Correntes



(a) correntes harmônicas



(b) tensões harmônicas

Figura 5.15 – Espectros harmônicos de tensões e correntes – Dessintonia otimizada

5.3.4 - Dessintonia Otimizada dos Braços e Alocação Otimizada da Potência Reativa

Apresenta-se neste item os resultados obtidos através do processo de otimização fundamentado na ação conjunta da redistribuição da potência reativa e da dessintonia dos braços do sistema de filtragem. Nestas condições, os valores otimizados dos parâmetros L e C são obtidos, visando-se a minimização das distorções harmônicas a partir da flexibilização da potência reativa alocada por braço e da dessintonia das freqüências de ressonâncias dos braços simultaneamente. A tabela 5.11 ilustra os resultados obtidos.

Tabela 5.11 – Dimensionamento com redistribuição e dessintonia otimizadas.

Dimensionamento dos filtros	braço 1	braço 2	braço 3
Fator de qualidade	50	50	50
Contribuição para correção do Fd (%)	33,33	33,33	33,33
Ordem harmônica de sintonia original	5	7	11
Contribuição otimizada para correção do Fd (%)	**51,01**	**31,86**	**17,13**
Ordem harmônica dessintonizada	**4,91**	**7,09**	**11,07**
Potência reativa capacitiva (pu)	-0,359	-0,224	-0,121
Reatância capacitiva para a fundamental (pu)	2,784	4,457	8,291
Capacitancia (F)	9,53E-04	5,95E-04	3,20E-04
Reatância indutiva para a fundamental (pu)	0,115	0,089	0,068
Indutância (H)	3,06E-04	2,35E-04	1,79E-04
Resistência (pu)	6,11E-06	4,70E-06	3,59E-06

Os índices de desempenho apurados mostram uma redução de todos os índices calculados em proporções variando aproximadamente entre 24% e 67%, conforme mostra a tabela 5.12. Diversos pesos PT e PI foram adotados nas simulações e os resultados sinalizam que não deve haver nenhuma expectativa de acúmulo dos efeitos produzidos pela dessintonia e pela redistribuição da potência reativa. As distorções finais obtidas foram 14,9% para a corrente de alimentação e 3,3% para a tensão da carga. Comparando-se com as distorções obtidas anteriormente, observa-se apenas uma ligeira melhora no índice associado à corrente de alimentação.

Tabela 5.12 – Índices de desempenho

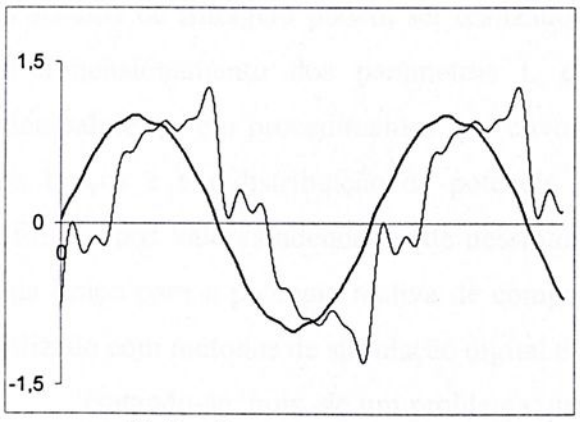
Critério de Otimização e Índices de Desempenho PT = 0,1 PI = 0,9			
Indice	Não Otimizado	Otimizado	Δ%
$\kappa_i(j)$	0,6192	0,2344	62,1
$\kappa_i(e)$	6,4945	4,9450	23,9
$\kappa_u(j)$	1,3956	0,4679	66,5
$\kappa_u(e)$	1,4807	0,8406	43,2
$\delta_i(j)$	0,2479	0,0938	62,1
$\delta_i(e)$	0,2243	0,1708	23,8
$\delta_u(j)$	0,0484	0,0162	66,5
$\delta_u(e)$	0,0514	0,0292	43,2
DIHT	0,2443	0,1492	38,9
DTHT	0,0707	0,0325	54,0

Novamente valem as mesmas observações anteriores com respeito às transmitâncias, ou seja, o aumento da eficácia da filtragem se deve às alterações das transmitâncias para a 6ª e 9ª ordens harmônicas, conforme mostrado na tabela 5.13.

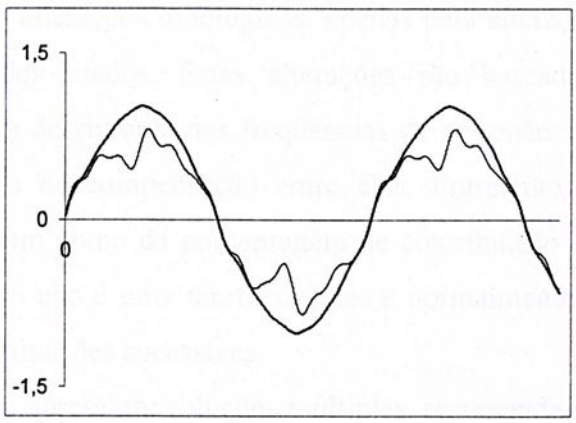
Tabela 5.13– Transmitâncias harmônicas para dessintonia otimizada dos braços.

h	Base			Dessintonia otimizada		
	A_h / B_h	Y_{xh}	Z_{yh}	A_h / B_h	Y_{xh}	Z_{yh}
2	1,07	1,10	0,07	1,07	1,15	0,07
3	1,31	3,02	0,14	1,35	3,38	0,14
4	2,88	13,67	0,40	4,83	28,00	0,67
5	0,00	5,79	0,00	0,11	5,17	0,02
6	**5,02**	**19,50**	**1,04**	**1,31**	**1,48**	**0,27**
7	0,00	4,14	0,00	0,08	4,45	0,02
8	0,51	1,79	0,14	0,36	2,32	0,10
9	**2,77**	**5,69**	**0,86**	**0,66**	**1,09**	**0,21**
10	0,39	4,02	0,13	26,10	77,75	9,01
11	0,00	2,63	0,00	0,03	2,71	0,01
12	0,12	2,11	0,05	0,18	1,97	0,08
13	0,19	1,81	0,08	0,26	1,64	0,12
14	0,23	1,60	0,11	0,30	1,44	0,15
15	0,52	1,44	0,13	0,45	1,29	0,17

As figuras 5.16 e 5.17 ilustram as formas de onda das tensões e correntes e dos seus espetros harmônicos, respectivamente.



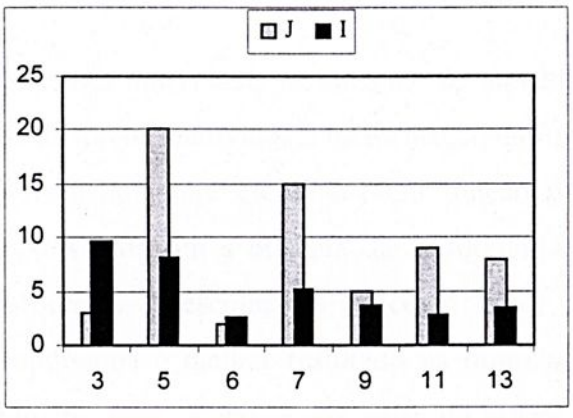
(a) Tensão e corrente na carga



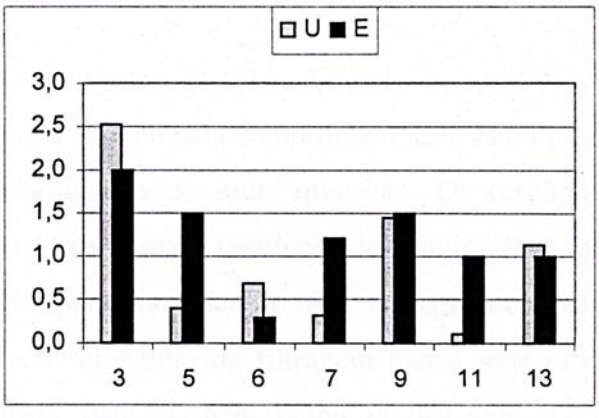
(a) tensão e corrente no sistema de alimentação

Figura 5.16 – Resultados Simulados - Redistribuição e dessintonia otimizadas

—Tensões —Correntes



(a) correntes harmônicas



(b) tensões harmônicas

Figura 5.17 – Espectros harmônicos de tensões e correntes – Redistribuição e dessintonia otimizadas

5.4 – Conclusões

A eficácia dos filtros harmônicos ressonantes depende fortemente das harmônicas remanescentes da corrente da carga e também das harmônicas da tensão de alimentação. Estas harmônicas, consideradas singulares, são muitas vezes desprezadas no procedimento de projeto do filtro, e consequentemente, a eficácia do filtro pode estar muito aquém das expectativas.

Quando as harmônicas singulares são consideradas durante os cálculos da eficácia do filtro, alguns procedimentos podem ser adotados no sentido de melhorar o desempenho do sistema de filtragem visando atender as normas e recomendações vigentes. Os ajustes da eficácia do sistema de filtragem podem ser realizados sem alterações topológicas, apenas pela alteração do dimensionamento dos parâmetros L e C dos braços. Estas alterações são baseadas, principalmente, em procedimentos que envolvem a dessintonia das freqüências de ressonâncias dos braços e a redistribuição da potência reativa de compensação entre eles. Entretanto, a definição dos valores adequados de dessintonia, bem como da porcentagem de contribuição de cada braço para a potência reativa de compensação não é uma tarefa simples e normalmente é realizada com métodos de simulação digital e aproximações sucessivas.

Tratando-se, pois, de um problema que pode apresentar soluções múltiplas, recomenda-se a utilização de um procedimento de otimização para a busca da solução mais adequada. A proposta apresentada neste capítulo considera o uso de um método de otimização para auxílio no dimensionamento dos parâmetros dos braços do sistema de filtragem visando a minimização das

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

distorções individuais na corrente de alimentação e na tensão da carga. O grau de significância das distorções individuais na formação da função a ser minimizada é controlado através de pesos convenientemente escolhidos em função da especificidade de cada aplicação. Os resultados obtidos mostram a eficácia da metodologia dentro dos limites tangíveis de minimização das distorções. A escolha do processo a ser adotado para modificação das transmitâncias que proporciona o melhor resultado na otimização do desempenho da filtragem não é uma tarefa simples, pois depende das especificidades de cada sistema, bem como do espectro e das amplitudes das harmônicas singulares. Neste sentido, fica praticamente descartada qualquer expectativa de produzir efeitos cumulativos através do uso simultâneo dos diferentes processos.

A metodologia de otimização analisada ainda apresenta alguns problemas relacionados com as restrições a serem consideradas no dimensionamento dos parâmetros L e C. Entre eles, destaca-se a definição do nível de potência reativa a ser compensada. O sistema de filtragem deve, em princípio, compensar totalmente a potência reativa da carga, embora uma compensação acima ou abaixo pode ser aceitável, desde que contribua efetivamente para a melhoria do processo de filtragem. Na medida em que se adota uma sub ou sobre-compensação, os prejuízos decorrentes do fator de deslocamento residual devem ser investigados. Neste trabalho, não foi incorporada ao processo de otimização nenhuma ação neste sentido, entretanto outros métodos de otimização que definem funções de penalidade podem ser utilizados para esta tarefa.

Destaca-se finalmente, que para os casos nos quais os níveis de harmônicas singulares, particularmente na tensão de distribuição, são elevados, e mesmo com os devidos ajustes otimizados dos parâmetros L e C dos braços de filtragem, os limites individuais estabelecidos em normas podem não ser atendidos. Nestes casos, outras opções devem ser consideradas como, por exemplo, a inclusão de um novo braço de filtragem devidamente sintonizado ou ainda alterações topológicas que incorporem braços com filtros amortecidos.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

CONCLUSÃO GERAL

Diante do crescimento expressivo de cargas não-lineares nos sistemas de energia elétrica, cresce também em proporções alarmantes os problemas relacionados com as distorções harmônicas na tensões e correntes. Embora as preocupações com as harmônicas sejam latentes, ainda persiste o crescimento do uso de equipamentos baseados na eletrônica de potência. Esta constatação se deve principalmente ao fato de que os benefícios técnicos e econômicos incorporados ao uso desta tecnologia são mais são muito mais visíveis do que os efeitos nocivos causados pelas harmônicas geradas durante sua operação.

Com relação à tecnologia de supressão harmônica em uso, destacam-se os sistemas passivos compostos por filtros harmônicos sintonizados e os condicionadores de energia, também conhecidos como filtros ativos.

Para um futuro próximo, acredita-se que filtros ativos e passivos coexistirão nas redes elétricas, e que muitos sistemas de filtragem deverão evoluir para arranjos híbridos, aglutinando as vantagens técnicas e econômicas das duas tecnologias.

Neste contexto se insere o presente trabalho, apresentando contribuições para o aperfeiçoamento de modelos matemáticos, a análise de desempenho dos sistemas de filtragem e a definição de diretrizes para o dimensionamento dos filtros passivos.

Inicialmente foram apresentados os principais conceitos e definições relacionados com o estudo de harmônicas e de sistemas de filtragem.

A evolução histórica das normas e recomendações a respeito do assunto foram apresentadas no capitulo 2. Foram observadas as principais particularidades de cada norma consultada através de uma análise comparativa. Neste contexto, foi destacada a norma IEEE 519, pois esta tem sido adotada na maioria das aplicações relacionadas com sistemas de energia

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

elétrica e é considerada como a principal referência na elaboração das normas brasileiras pelo ONS – Operador Nacional do Sistema. Por estas razões, esta norma também foi utilizada ao longo do desenvolvimento do trabalho para identificar a violação de limites nas análises apresentadas.

Com relação a definição de modelos para análise e dimensionamento de filtros passivos, apresentou-se no capitulo 3 uma metodologia baseada na resposta em freqüência de quatro transmitâncias obtidas a partir das impedâncias do sistema de filtragem, do sistema alimentador e da carga. A aplicação desta metodologia mostrou-se particularmente atrativa porque permite uma avaliação rápida e sistemática do comportamento do filtro frente a diferentes condições de operação. Vários casos foram analisados envolvendo os efeitos das harmônicas singulares e dos diferentes parâmetros que definem as transmitâncias sobre o desempenho do sistema de filtragem. Para isto, foi desenvolvido e implementado um aplicativo computacional na plataforma Microsoft Excel 2000, apresentado no capítulo 4. A validação dos resultados foi realizada com auxílio do *Pspice,* por ser um *software* comercial muito utilizado e de grande credibilidade no meio científico. Apesar da coerência entre os resultados obtidos, recomenda-se que os métodos convencionais baseados em simulação digital no domínio do tempo, apesar de lentos e particularizados para situações operacionais específicas, não sejam descartados. O método das transmitâncias incorpora algumas simplificações que podem comprometer os resultados sob algumas condições operacionais particulares e neste sentido, acredita-se que os melhores resultados sejam obtidos através do uso combinado das duas metodologias.

Na seqüência do trabalho, no capítulo 5 foram apresentadas propostas para o dimensionamento adequado, objetivando a maximização do desempenho operacional de um sistema de filtragem passiva. O processo adotado consiste da otimização dos ajustes das freqüências de sintonia e da distribuição da potência reativa capacitiva total associada à correção do fator de deslocamento entre os diferentes braços de filtros sintonizados. Para isto, foram utilizadas rotinas específicas de otimização disponíveis na plataforma de desenvolvimento Microsoft Excel 2000. Os resultados obtidos são expressivos e demonstram claramente a importância do uso de uma metodologia de otimização para a busca de soluções mais atrativas para auxilio no dimensionamento dos sistemas de filtragem. A utilização desta metodologia evita o uso do método convencional baseado em tentativa e erro, pois, além de ser um processo exaustivo e lento, nem sempre produz resultados satisfatórios.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

No contexto deste trabalho várias contribuições podem ser identificadas. Entre elas, destacam-se como principais:

- a incorporação de novos conhecimentos relacionados com aplicação de filtros harmônicos no âmbito da equipe de trabalho do Laboratório de Qualidade de Energia da FEIS – UNESP;

- a análise e a implementação de modelos que permitiram a compreensão dos fenômenos associados à degradação da eficiência da filtragem na presença de harmônicas singulares;

- o desenvolvimento e a implementação de um aplicativo computacional para análise de desempenho de sistemas de filtragem passiva do tipo FHR;

- a incorporação de rotinas de otimização para estabelecer diretrizes para o ajuste de parâmetros em projetos de sistemas de filtragem passiva.

Finalmente, como sugestões para a continuidade do trabalho, cita-se:

- melhorias no método de otimização através de incorporação de condições restritivas e penalidades, particularmente para o procedimento relacionado com a determinação dos níveis de potência reativa a ser compensada;

- incorporação de um ambiente gráfico e interativo para o gerenciamento da planilha desenvolvida em Excel, utilizando-se uma linguagem de programação apropriada;

- estudos adicionais envolvendo a constituição de sistemas de filtragem híbridos baseados em filtros passivos sintonizados e filtros ativos, objetivando arranjos alternativos mais atrativos do ponto de vista técnico e econômico.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[01] Leitão, J. J. A. L., " Impactos econômicos causados pelos distúrbios na rede básica de energia elétrica", 2002, Tese de doutorado – USP – São Paulo – SP.

[02] Cigre report 119: Methods to consider customers interruption cost in power systems analysis, August, 2001.

[03] Magalhães, C.H.N.; Gouvea, M.R.; Silva, F.A.T; Tahan, C.M.V.; Araújo Filho, L.G.C; " Custo da Interrupção do fornecimento de energia elétrica". IV Seminário Brasileiro Sobre Qualidade de Energia Elétrica, SBQEE, Porto Alegre, Agosto 2001, p. 373-377.

[04] Owen, E.L. "A History of Harmonics in Power Systems" - IEEE Industry Applications Magazine, January/February 1998, pp. 6-12.

[05] IEEE Task Force, "Effect of Harmonics on Equipment", IEEE Trans. On Power Del., p.672-680, vol.8, n.2, April 1993.

[06] Gruzs, T.M. "A Survey of Neutral Currents in Three-Phase Computer Power Systems" - IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 26, N° 4, July/August 1990, pp. 719-725.

[07] Purkayastha, I.; Savoie, P.J. "Effect of Harmonics on Power Measurement" - IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 26, nº 5, September/October 1990, pp. 944-946.

[08] Henderson, R.D. "Harmonics: The Effects on Power Quality and Transformers" - IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 30, nº 3, May/June 1994, pp. 1020-1025.

[09] Massey, G.W. "Estimation Methods for Power System Harmonic Effects on Power Distribution Transformers" - IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 30, nº 2, March/April 1994, pp. 485-489.

[10] Czarnecki, L.S.; "An overview of methods of harmonic suppression in distribution systems," Proceeding of the 2000 IEEE PES Summer Meeting, Seattle, USA. 1999.

[11] Phipps, J.K. and Nelson, J.P. "Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems" - IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 30, nº 2, March/April 1994, pp. 476-484.

[12] Pereira, O. O., "Estudo da Distorção Harmônica em um Sistema Trifásico de Baixa Tensão". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 1992.

[13] Akagi, H, "New trends in active filters for power conditioning", IEEE Trans. On Ind. App., Vol. 32, N.6, Nov/Dec 1996, pp. 1312-1322.

[14] Peng, F.Z and Akagi, H, Nabae, A, "A new approach to harmonic compensattion in power systems", IEEE paper N. 88CH2585-0/88/0000-0874.

[15] Mattevelli, P. and Tenti, P, "Design aspects of hybrid compensation systems", Europ. Trans. On Electrical Power, ETEP, Vol.8, N.5, Sept/Oct. 1998, pp. 375-381.

[16] Gyugyi, L. and Strycula, E.C, "Active AC power filters", Conf. Rec., IEEE IAS, 1976, pp.529-535.

[17] Peng, F.Z. "Compensation Characteristics of Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters" - IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 29, nº 1, January/February 1993, pp. 144-151.

[18] Arrillaga, J, "Power System Harmonic Analysis", John Wiley, 1997.

[19] Baleeiro, A.C.A. "Análise de problemas e procedimentos na determinação de filtros harmônicos", 1991. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Uberlândia – MG.

[20] Kelher, C.J. "A correta aplicação da norma IEEE 519 na indústria e o desempenho dos acionamentos", Revista Eletricidade Moderna, Ano XXXII, n. 358, Janeiro 2004.

[21] Key, T. S. e Lai, J. S. "Comparison of Standards and Power Supply Design Options for Limiting Harmonic Distortion in Power Sistems". IEEE Transaction on Industry Applications. Vol. 29, No. 4, Julho/Agosto 1993, pp. 688-695.

[22] IEEE 519-1992 "IEEE Recomended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems". 1992. Pag. 75-86.

[23] McGranaghan "Overview of the Guide for Applying Harmonics Limits on Power Systems – IEEE P519A, International Conference on Harmonics and Quality of Power ICHQP 98, Athens, Greece, October 1998.

[24] IEC 1000-2-2 - Electromagnetic compatibility (EMC), Part 2, Section 2:"Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems", First edition, 1990-05.

[25] IEC 1000-3-2 – Electromagnetic compatibility (EMC), Part 3, Section 2: "Limits for harmonic current emissions" *(equipment with rated current ≤ 16 A per phase*, First Edition, 1995.

[26] IEC 1000-3-6 – Electromagnetic compatibility (EMC), Part 3, Section 6: "Assessment of emission limits for distortion loads in MV and HV power systems", First edition, 1996-10.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

[27] IEC 1000-4-7 – Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4, Section 7: "General guide on harmonics measurement and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto", First edition, 1991-07.

[28] "Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais". Fevereiro de 1993. GCOI/SCEL e GCPS/CTST.

[29] "Procedimentos de Medição para Aferição da Qualidade da Onda de Tensão Quanto ao Aspecto de Conformidade (distorção harmônica, flutuação e desequilíbrio de tensão)". Novembro de 1997. GCOI/SCEL e GCPS/CTST.

[30] European Standard EN50160 – "Voltage Characteristics of Eletricity Supplied by Public Distribution Systems". Novembro 1994.

[31] NRS 048-1:1996 – "Electricity Supply – Quality of Supply" – Part 1: Overview of implementation of standards and procedures. Novembro de 1996.

[32] NRS 048-2:1996 – "Electricity Supply – Quality of Supply" – Part 2: Minimum standards. Novembro de 1996.

[33] NRS 048-4:1996 – "Electricity Supply – Quality of Supply Standards" – Part 4: Implications and guidelines for utilities and their customers. Novembro de 1996.

[34] NRS 048-3:1998 – "Electricity Supply – Quality of Supply" – Part 3: Procedures for measurement and reporting", Novembro de 1998.

[35] NRS 048-5:1998 – "Electricity Supply – Quality of Supply" – Part 5: Instrumentation and transducers for voltage quality monitoring and recording. Novembro de 1998.

[36] "Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos" – Normas Legales – Diario Oficial El Peruano – Energia y Minas – 11 de Octubre de 1997 – Pag. 153351 – 153362.

[37] "Base Metodológica para la Aplicación de la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos" – Diario Oficial El Peruano – Separata Especial – 17 de Noviembre de 1998 – Pag. 2 – 5.

[38] "Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos" – Normas Legales – Diario Oficial El Peruano – Energia y Minas – 11 de Abril de 1999 – Pag. 171965 - 171967.

[39] "Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos" – Normas Legales – Diário Oficial El Peruano – Energia y Minas – Erratas - 17 de Octubre de 1997 – Pag. 153570.

[40] ONS – "Padrões de Desempenho da Rede Básica" – Submódulo 2.2 – 24 de Dezembro de 2002.

[41] ONS – "Requisitos Técnicos Para a Conexão à Rede Básica" – Submódulo 3.8 – 25 de Março de 2002.

[42] Boletins internos do ONS – Síntese Geral da Qualidade de Energia Elétrica - Ano II- n. 06 2. Trimestre 2002.

[43] Dewan, S.B.; "Optimum input and output filters for a single phase rectifiers power supply". IEEE transactions on Industry Application, IA-17, n.3, May-June 1981.

[44] Czarnecki, L.S."Effects of minor harmonics on the performance of resonant harmonic filters in distribution systems," Proc. IEE, Electric Power Appl., Vol. 144, No. 5, pp. 349-356, September 1997.

[45] Czarnecki, L.S.; Ginn H. "Effectiveness of resonant harmonic filters and its improvement," Proc. of the 2000 IEEE PES Summer Meeting, Seattle, USA.

[46] Dodge M.; Stinson, C. "Excel2000, Manual de Referência" – Makron Books - 2001

[47] Strojny, J. "Some problems of harmonic filters construction for AC supply systems", Int. Conf. on Sources and Effects of Power System Disturbances, London, 1974, pp. 168-171.

[48] Steeper, D.E.; Stradford, R.P. " Reactive compensation and harmonic suppression for industrial power systems using thyristor converters", IEEE Trans. on IA, vol. 12, N.3, May/June 1976, pp. 232-254

[49] Wu C.J, Jen J.C, Liao C.J, Jang J.S and Guo T.Y, "Investigation and mitigation of harmonic amplification problems caused by single-tuned filters", IEEE Trans. On Power Delivery , Vol.13, N.3, Jully 1998, pp. 800-806.

[50] Ruthman, D., "Low voltage filter considerations for three phase industrial systems", 1994, IEEE PES Winter Meeting, New York, 1994.

[51] Reid, W.E and Puskarich K.A, "Harmonic filter application criteria", 1994, IEEE PES Winter Meeting, New York, 1994.

[52] Stackard, H. "Capacitor Bank with harmonic filters", ASEA J., 1961, 34 (5), pp. 75-78.

[53] Bonner J. A, Hurst W.M, Dudley R.F, Sharp M.R and Twiss J.A, "Selecting ratings for capacitors and reactors in applications involving multiple single-tuned filters", IEEE PES Society 1994 Summer Meeting, Paper N. 94 SM 457-2 PWRD.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

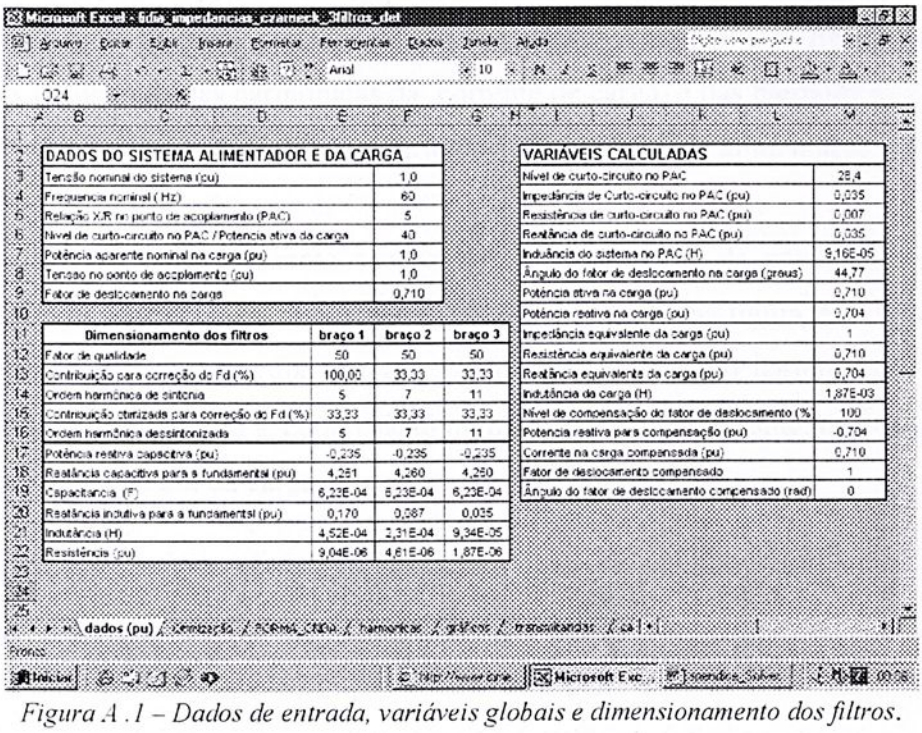
APÊNDICE I

Aplicativo – Análise e Dimensionamento de Filtros Passivos

I.1 - Apresentação

Objetivando dispor de um ambiente computacional de baixo custo, facilidades de implementação dos procedimentos de cálculo necessários e já bastante difundida no setor, optou-se pela utilização de planilhas de cálculo, notadamente o Microsoft Excel 2000 ®.

Para a implementação computacional foram criadas oito planilhas com variáveis compartilhas. Na primeira foram implementadas as entradas de dados, as equações o cálculo das variáveis globais e dos parâmetros relacionados com o dimensionamento dos braços do sistema de filtragem. A figura I.1 ilustra a tela relativa à planilha citada.



DADOS DO SISTEMA ALIMENTADOR E DA CARGA	
Tensão nominal do sistema (pu)	1,0
Frequencia nominal (Hz)	60
Relação X/R no ponto de acoplamento (PAC)	5
Nível de curto-circuito no PAC /Potencia ativa da carga	40
Potência aparente nominal na carga (pu)	1,0
Tensao no ponto de acoplamento (pu)	1,0
Fator de deslocamento na carga	0,710

Dimensionamento dos filtros	braço 1	braço 2	braço 3
Fator de qualidade	50	50	50
Contribuição para correção do Fd (%)	100,00	33,33	33,33
Ordem harmônica de sintonia	5	7	11
Contribuição otimizada para correção do Fd (%)	33,33	33,33	33,33
Ordem harmônica dessintonizada	5	7	11
Potência reativa capacitiva (pu)	-0,235	-0,235	-0,235
Reatância capacitiva para a fundamental (pu)	4,251	4,260	4,250
Capacitancia (F)	6,23E-04	6,23E-04	6,23E-04
Reatância indutiva para a fundamental (pu)	0,170	0,087	0,035
Indutância (H)	4,52E-04	2,31E-04	9,34E-05
Resistência (pu)	9,04E-06	4,61E-06	1,87E-06

VARIÁVEIS CALCULADAS	
Nível de curto-circuito no PAC	28,4
Impedância de Curto-circuito no PAC (pu)	0,035
Resistência de curto-circuito no PAC (pu)	0,007
Reatância de curto-circuito no PAC (pu)	0,035
Indutância do sistema no PAC (H)	9,16E-05
Ângulo do fator de deslocamento na carga (graus)	44,77
Potência ativa na carga (pu)	0,710
Potência reativa na carga (pu)	0,704
Impedância equivalente da carga (pu)	1
Resistência equivalente da carga (pu)	0,710
Reatância equivalente da carga (pu)	0,704
Indutância da carga (H)	1,87E-03
Nível de compensação do fator de deslocamento (%	100
Potencia reativa para compensação (pu)	-0,704
Corrente na carga compensada (pu)	0,710
Fator de deslocamento compensado	1
Ângulo do fator de deslocamento compensado (rad)	0

Figura A .1 – Dados de entrada, variáveis globais e dimensionamento dos filtros.

A segunda planilha reúne as equações para o cálculo e comparação dos índices de desempenho do sistema de filtragem, bem como das quatro transmitâncias utilizadas na metodologia. A tela referente à planilha citada é ilustrada na figura A.2.

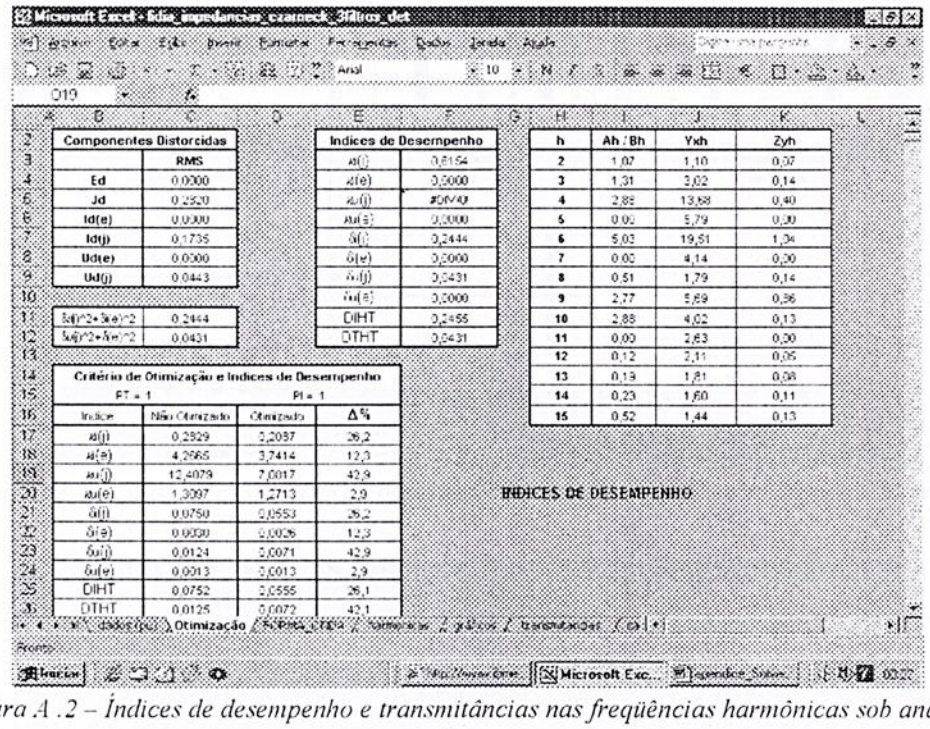


Figura A .2 – Índices de desempenho e transmitâncias nas freqüências harmônicas sob análise.

As tensões e correntes no domínio do tempo são apresentadas na planilha ilustrada na figura A.3. Apresenta-se também nesta planilha os espectros harmônicos finais, bem como as contribuições individuais das harmônicas da corrente de carga e das harmônicas da tensão de alimentação na composição do conteúdo harmônica da corrente de alimentação e da tensão no barramento da carga.

A entrada de dados referente aos conteúdos harmônicos da corrente de carga e da tensão de alimentação é apresentada na tela da planilha ilustrada na figura A.4. Nesta planilha, são calculadas as contribuições individuais das fontes de distorção harmônica e realizada a totalização dos resultados para a composição harmônica final na corrente total de alimentação e na tensão no barrramento da carga.

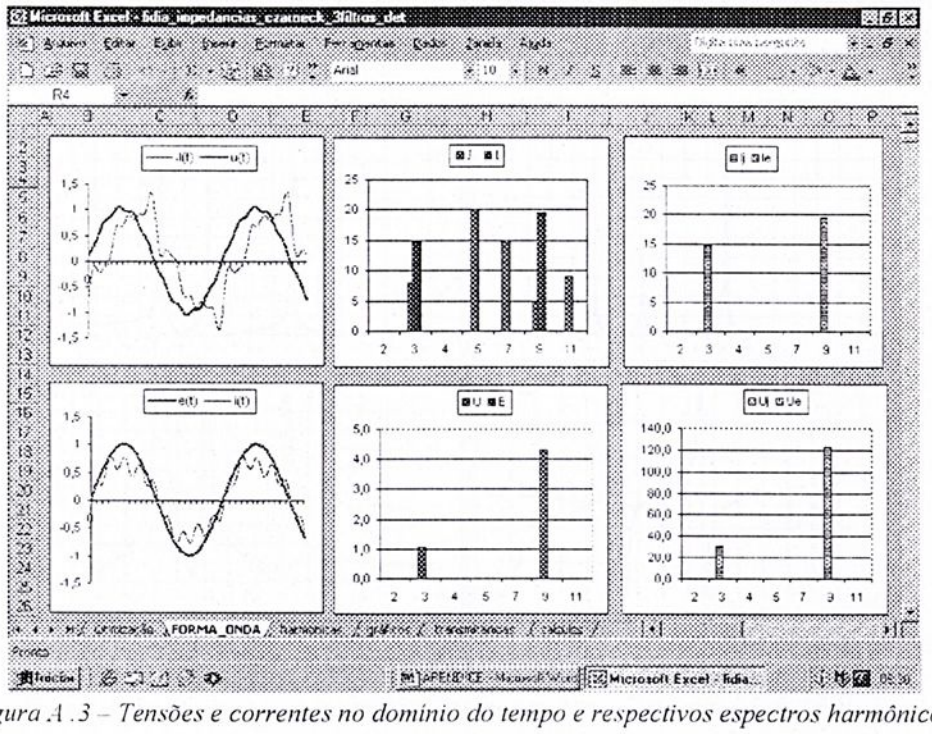
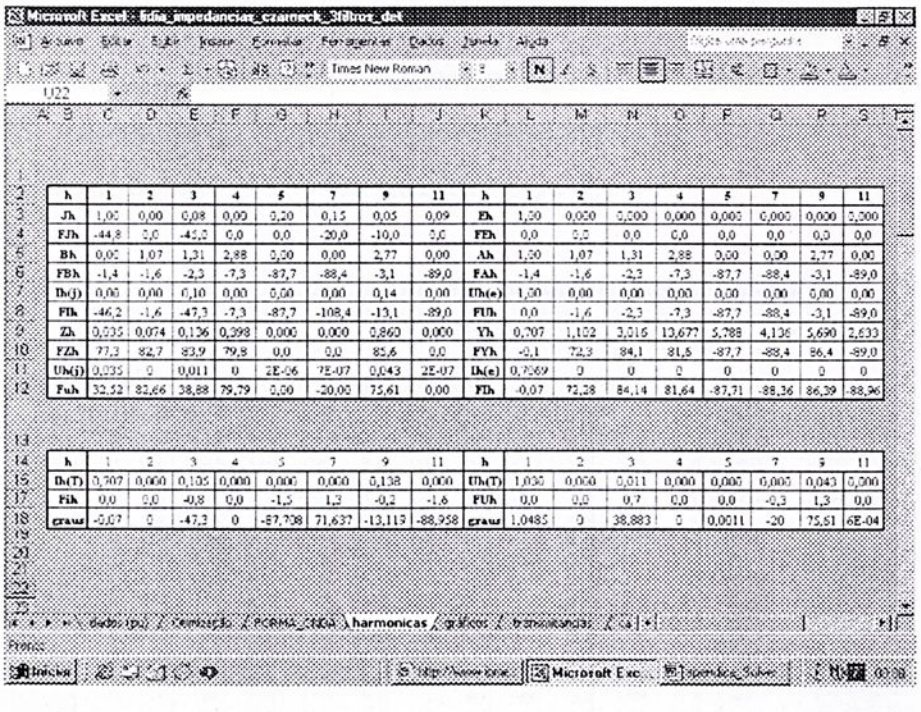


Figura A .3 – Tensões e correntes no domínio do tempo e respectivos espectros harmônicos.



h	1	2	3	4	5	7	9	11	h	1	2	3	4	5	7	9	11
Ih	1,00	0,00	0,08	0,00	0,20	0,15	0,05	0,09	Eh	1,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
FIh	-44,8	0,0	-45,3	0,0	0,0	-20,0	-10,0	0,0	FEh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Bh	0,02	1,07	1,31	2,88	0,00	0,00	2,77	0,00	Ah	1,00	1,07	1,31	2,88	0,00	0,00	2,77	0,00
FBh	-1,4	-1,6	-2,3	-7,3	-87,7	-88,4	-3,1	-89,0	FAh	-1,4	-1,6	-2,3	-7,3	-87,7	-88,4	-3,1	-89,0
Ih(j)	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	Ih(e)	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FIh	-46,2	-1,6	-47,3	-7,3	-87,7	-108,4	-13,1	-89,0	FIh	0,0	-1,6	-2,3	-7,3	-87,7	-88,4	-3,1	-89,0
Zh	0,035	0,074	0,136	0,398	0,000	0,000	0,860	0,000	Yh	0,707	1,102	3,016	13,677	5,788	4,136	5,690	2,633
FZh	77,3	82,7	83,9	79,8	0,0	0,0	85,6	0,0	FYh	-0,1	72,3	84,1	81,6	-87,7	-88,4	86,4	-89,0
Uh(j)	0,035	0	0,011	0	2E-06	7E-07	0,043	2E-07	Ih(e)	0,7069	0	0	0	0	0	0	0
Fuh	32,52	82,66	38,88	79,79	0,00	-20,00	75,61	0,00	FIh	-0,07	72,28	84,14	81,64	-87,71	-88,36	86,39	-88,96

h	1	2	3	4	5	7	9	11	h	1	2	3	4	5	7	9	11
Ih(T)	0,707	0,000	0,105	0,000	0,000	0,000	0,138	0,000	Uh(T)	1,000	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000	0,043	0,000
Fih	0,0	0,0	-0,8	0,0	-1,5	1,2	-0,2	-1,6	FUh	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	-0,3	1,3	0,0
graus	-0,07	0	-47,3	0	-87,708	71,637	-13,119	-88,958	graus	1,0485	0	38,883	0	0,0011	-20	75,51	6E-04

Figura A .4 – Entrada de dados das distorções, cálculo das contribuições e totalização dos resultados.

A tela do aplicativo desenvolvido, que ilustra os resultados obtidos para a resposta em freqüência das transmitâncias, da impedância de curto-circuito do sistema alimentador e da impedância equivalente resultante da associação paralela da impedância do sistema de filtragem e da carga, é apresentada na figura A.5.

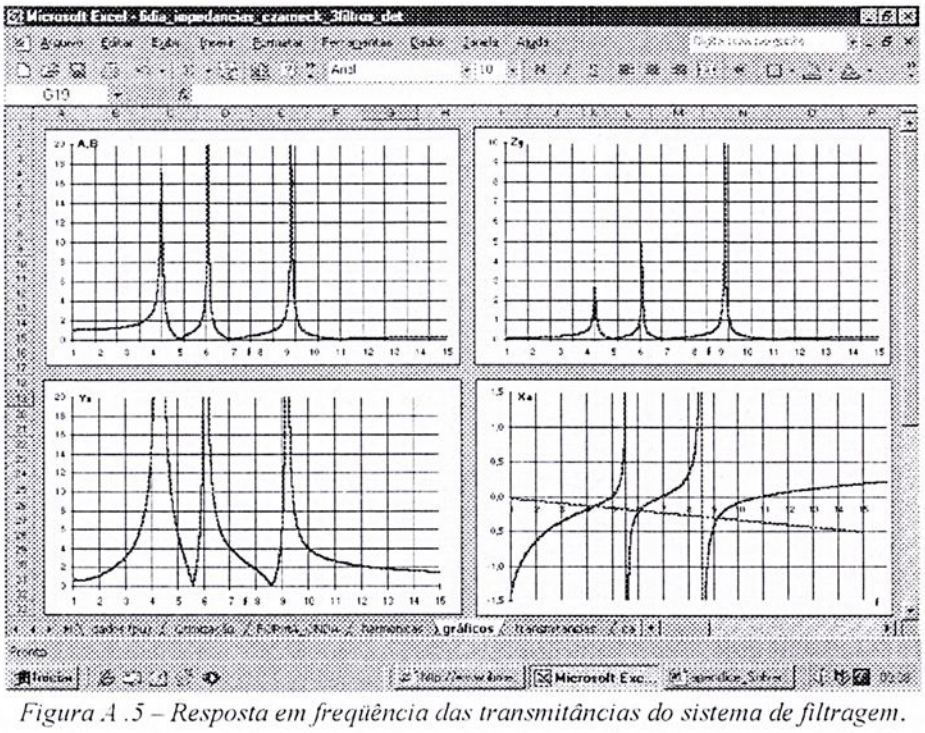
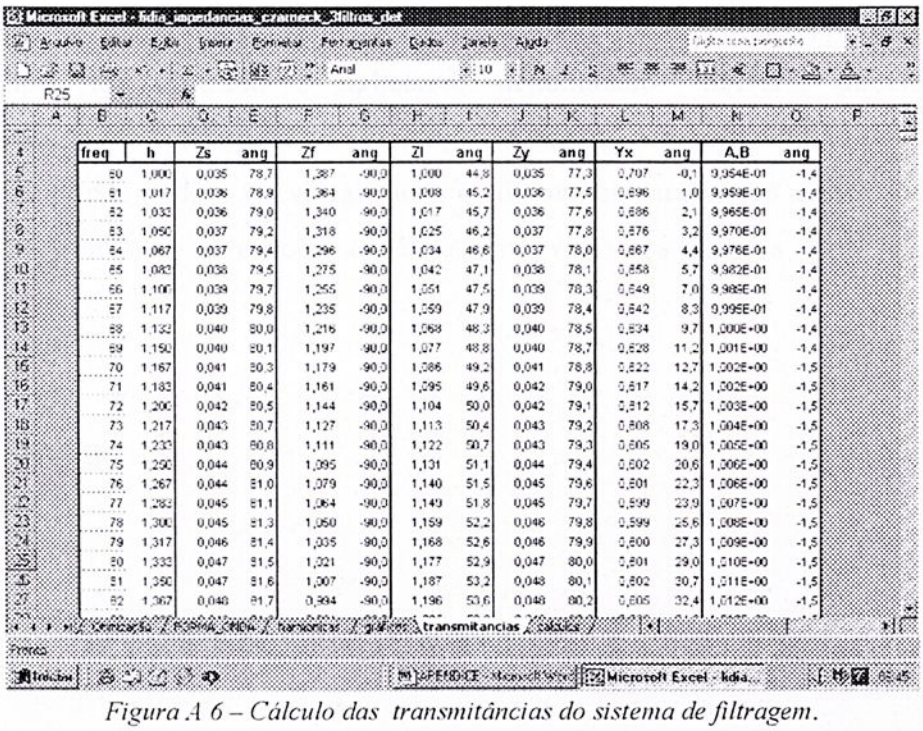


Figura A .5 – Resposta em freqüência das transmitâncias do sistema de filtragem.

As demais planilhas que compõem o aplicativo referem-se os cálculos das transmitâncias em função da freqüência e das associações série e paralela envolvidas no processo. As telas do aplicativo são ilustradas na figura A.6 e A.7



freq	h	Zs	ang	Zf	ang	Zl	ang	Zy	ang	Yx	ang	A,B	ang
50	1,000	0,035	78,7	1,287	-90,0	1,000	44,8	0,035	77,3	0,707	-0,1	9,954E-01	-1,4
51	1,017	0,036	78,9	1,264	-90,0	1,008	45,2	0,036	77,5	0,696	1,0	9,959E-01	-1,4
52	1,033	0,036	79,0	1,240	-90,0	1,017	45,7	0,036	77,6	0,686	2,1	9,965E-01	-1,4
53	1,050	0,037	79,2	1,218	-90,0	1,025	46,2	0,037	77,8	0,676	3,2	9,970E-01	-1,4
54	1,067	0,037	79,4	1,196	-90,0	1,034	46,6	0,037	78,0	0,667	4,4	9,976E-01	-1,4
55	1,083	0,038	79,5	1,175	-90,0	1,042	47,1	0,038	78,1	0,658	5,7	9,982E-01	-1,4
56	1,100	0,039	79,7	1,155	-90,0	1,051	47,5	0,039	78,3	0,649	7,0	9,988E-01	-1,4
57	1,117	0,039	79,8	1,135	-90,0	1,059	47,9	0,039	78,4	0,642	8,3	9,995E-01	-1,4
58	1,133	0,040	80,0	1,116	-90,0	1,068	48,3	0,040	78,5	0,634	9,7	1,000E+00	-1,4
59	1,150	0,040	80,1	1,097	-90,0	1,077	48,8	0,040	78,7	0,628	11,2	1,001E+00	-1,4
70	1,167	0,041	80,3	1,079	-90,0	1,086	49,2	0,041	78,8	0,622	12,7	1,002E+00	-1,5
71	1,183	0,041	80,4	1,061	-90,0	1,095	49,6	0,042	79,0	0,617	14,2	1,002E+00	-1,5
72	1,200	0,042	80,5	1,044	-90,0	1,104	50,0	0,042	79,1	0,612	15,7	1,003E+00	-1,5
73	1,217	0,043	80,7	1,027	-90,0	1,113	50,4	0,043	79,2	0,608	17,3	1,004E+00	-1,5
74	1,233	0,043	80,8	1,011	-90,0	1,122	50,7	0,043	79,3	0,605	19,0	1,005E+00	-1,5
75	1,250	0,044	80,9	1,095	-90,0	1,131	51,1	0,044	79,4	0,602	20,6	1,006E+00	-1,5
76	1,267	0,044	81,0	1,079	-90,0	1,140	51,5	0,045	79,6	0,601	22,3	1,006E+00	-1,5
77	1,283	0,045	81,1	1,064	-90,0	1,149	51,8	0,045	79,7	0,599	23,9	1,007E+00	-1,5
78	1,300	0,045	81,3	1,050	-90,0	1,159	52,2	0,046	79,8	0,599	25,6	1,008E+00	-1,5
79	1,317	0,046	81,4	1,035	-90,0	1,168	52,6	0,046	79,9	0,600	27,3	1,009E+00	-1,5
80	1,333	0,047	81,5	1,021	-90,0	1,177	52,9	0,047	80,0	0,601	29,0	1,010E+00	-1,5
81	1,350	0,047	81,6	1,007	-90,0	1,187	53,2	0,048	80,1	0,602	30,7	1,011E+00	-1,5
82	1,367	0,048	81,7	0,994	-90,0	1,196	53,6	0,048	80,2	0,605	32,4	1,012E+00	-1,5

Figura A 6 – Cálculo das transmitâncias do sistema de filtragem.

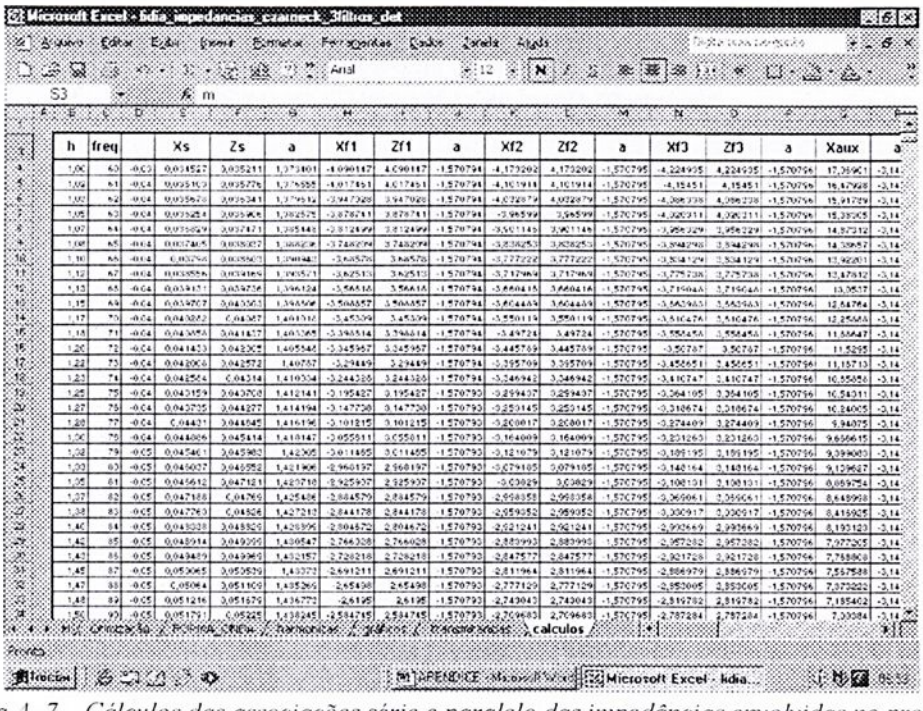


Figura A .7 -- Cálculos das associações série e paralelo das impedâncias envolvidas no processo.

O problema tratado neste trabalho envolve a solução de um sistema de equações algébricas não-lineares com restrições. A solução para este tipo de problema no ambiente Excel pode ser obtida através do uso de rotinas suplementares que acompanham as versões mais recentes desta planilha de cálculo. O suplemento "Ferramentas de Análise",, disponível no ambiente Excel2000, oferece um conjunto de rotinas pré-programadas para a análise de dados e outros cálculos especializados. Particularmente, para o problema formulado neste trabalho, foi utilizado o aplicativo denominado "Solver", direcionado para implementação de procedimentos de otimização. A figura A.8 apresenta a tela do aplicativo sendo utilizado, onde podem ser visualizados os diferentes parâmetros associados ao método de otimização, bem como as respectivas células envolvidas nos cálculos.

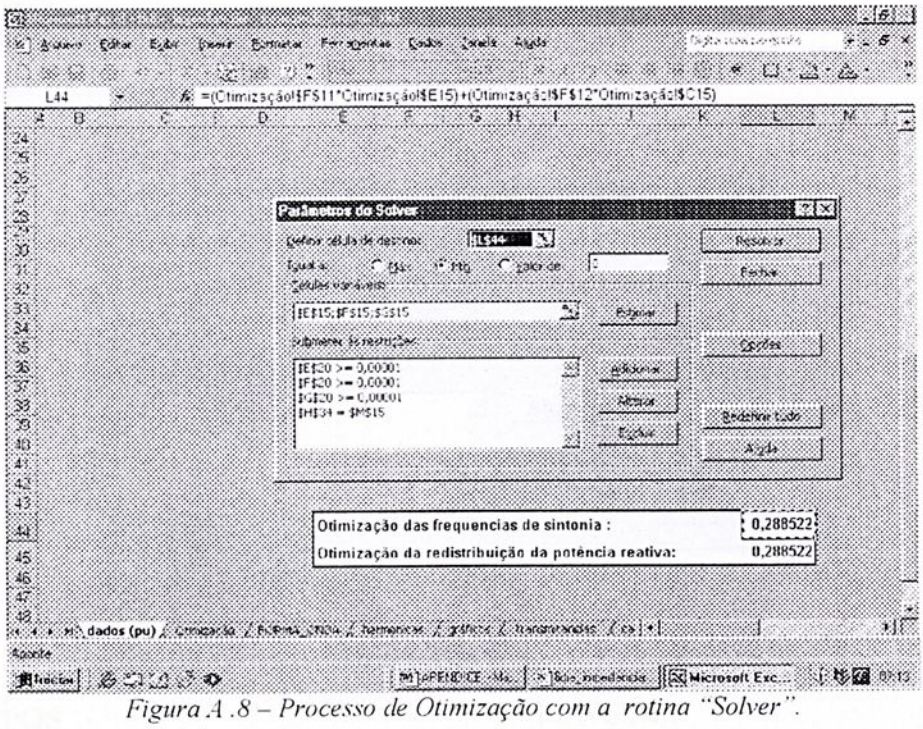


Figura A .8 – Processo de Otimização com a rotina "Solver".

I.2 Método de Otimização e Descrição da Rotina SOLVER

O Solver faz parte de um conjunto de programas referenciados como ferramentas de análise hipotética. O Solver trabalha com um grupo de células relacionadas direta ou indiretamente com a fórmula na célula de destino. Usa métodos de otimização para ajustar os valores especificados nas células variáveis no sentido de produzir o resultado especificado na fórmula da célula de destino.

Para a solução de problemas não-lineares o Microsoft Excel Solver usa o código de otimização não linear de gradiente reduzido genérico (GRG2), desenvolvido *Leon Lasdon*, da Universidade do Texas em Austin e *Allan Waren*, da Universidade Estadual de Cleveland [46]. Os problemas lineares e de inteiros usam o método simplex com limites sobre as variáveis e o método de desvio e limite, implementado por *John Watson* e *Dan Fylstra*, da Frontline Systems, Inc. Outras informações sobre o processo interno de solução usado pelo Solver, podem ser obtidas no endereço : http://www.frontsys.com

I.2.1 Caixa de diálogo do SOLVER

A figura A.9 ilustra a caixa de diálogo utilizada pela rotina Solver, bem como as respectivas células vinculadas à planilha de controle descrita anteriormente. A descrição dos

campos para entrada de dados e das funções de ativação do processo de otimização encontram-se descritas na tabela A.1.

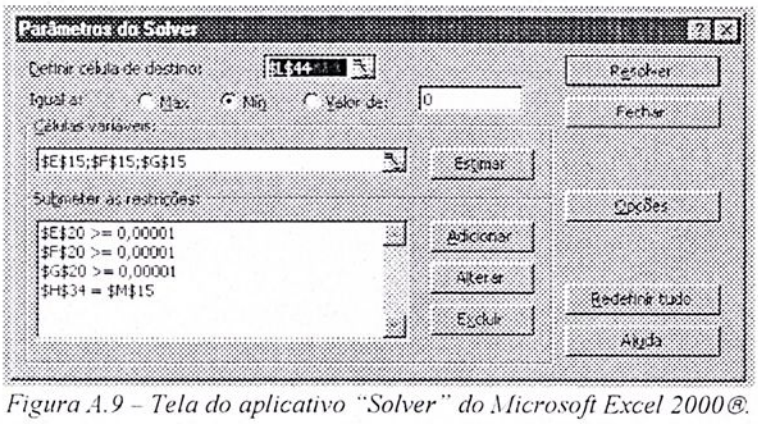


Figura A.9 – Tela do aplicativo "Solver" do Microsoft Excel 2000®.

Tabela A.1 – Descrição dos campos e das funções de ativação.

CAMPOS	FUNÇÕES
Célula de destino	Especifica a célula onde se encontra a função a ser otimizada. Esta célula deve conter uma fórmula. No caso específico, nesta célula encontra-se programado o cálculo ponderado das distorções de tensão e corrente.
Igual a	Especifica a forma com que a função deve ser otimizada. Para a aplicação específica neste trabalho foi escolhida a opção minimizar.
Células variáveis	Especifica as variáveis que podem ser ajustadas objetivando a otimização desejada. As células variáveis devem estar relacionadas direta ou indiretamente com a célula de destino. Neste caso, foram direcionados para este item os valores dos fatores de distribuição da potência reativa e das freqüências de sintonia dos braços do sistema de filtragem.
Submeter às restrições	Lista as restrições atuais para o problema. Neste caso, as restrições estabelecidas referem-se aos limites aceitáveis para as indutâncias, capacitância e nível de compensação a ser atendido.
AÇÕES	**FUNÇÕES**
Estimar	Efetua os cálculos necessários para determinação dos valores contidos nas células variáveis referenciadas.
Alterar	Exibe a caixa de diálogo para alteração das restrições impostas.
Adicionar	Exibe a caixa de diálogo adicionar novas restrições.
Excluir	Exibe a caixa de diálogo remover restrições impostas.
Resolver	Inicia o processo otimização para o problema definido.

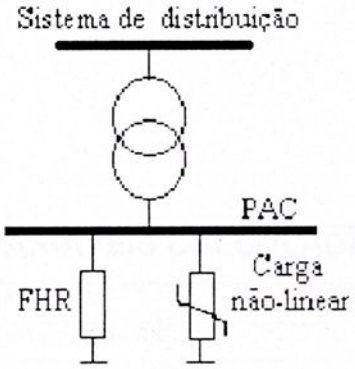
cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17

Fechar	Desabilita o módulo SOLVER
Opções	Exibe a caixa de diálogo salvar modelos de problemas e controlar os recursos avançados do processo de otimização.
Redefinir tudo	Cancela as definições atuais do problema.

APÊNDICE II

Procedimentos de Cálculo e Dimensionamento

II.1 – Dados



DADOS DO SISTEMA ALIMENTADOR E DA CARGA	
Tensão nominal do sistema (pu)	1,0
Freqüência nominal (Hz)	60
Relação X/R no ponto de acoplamento (PAC)	5
Nível de curto-circuito no PAC / Potencia ativa da carga	40
Potência aparente nominal na carga (pu)	1,0
Tensão no ponto de acoplamento (pu)	1,0
Fator de deslocamento na carga	0,710

II.2 – Parâmetros Calculados

a) Potência ativa na carga: $P_L = S_L.\cos\phi$

b) Nível de curto-circuito no PAC: S_{CC}

c) Impedância de curto-circuito no PAC: $|Z_{CC}| = V^2 / S_{CC}$

d) Resistência de curto-circuito no PAC : $|Z_{CC}| = \sqrt{R_{CC}^2 + X_{CC}^2} = R_{CC}\sqrt{1 + (X_{CC} / R_{CC})^2}$

e) Reatância de curto-circuito no PAC: $X_{CC} = \sqrt{Z_{CC}^2 - R_{CC}^2}$

f) Indutância do sistema "vista" pelo PAC: $L_{CC} = X_{CC} / \omega$

g) Ângulo do fator de deslocamento na carga: $\phi_{FD} = \cos^{-1}(F_d)$

h) Potência reativa na carga: $Q_L = \sqrt{S_L^2 - P_L^2}$

i) Impedância equivalente da carga: $Z_L = R_L + j.X_L$

j) Resistência equivalente da carga: $R_L = Z_L.\cos\phi$

k) Reatância equivalente da carga: $X_L = Z_L.sen\phi$

l) Indutância da carga: $L_L = \dfrac{X_L}{\omega}$

VARIÁVEIS CALCULADAS	
Nível de curto-circuito no PAC	28,4
Impedância de Curto-circuito no PAC (pu)	0,035
Resistência de curto-circuito no PAC (pu)	0,007
Reatância de curto-circuito no PAC (pu)	0,035
Indutância do sistema no PAC (H)	9,16E-05
Ângulo do fator de deslocamento na carga (graus)	44,77
Potência ativa na carga (pu)	0,710
Potência reativa na carga (pu)	0,704
Impedância equivalente da carga (pu)	1
Resistência equivalente da carga (pu)	0,710
Reatância equivalente da carga (pu)	0,704
Indutância da carga (H)	1,87E-03
Nível de compensação do fator de deslocamento (%)	100
Potencia reativa para compensação (pu)	-0,704
Corrente na carga compensada (pu)	0,710
Fator de deslocamento compensado	1
Ângulo do fator de deslocamento compensado (rad)	0

II.3 – Dimensionamento

a) Nível de compensação : NC (%)

b) Potência reativa a se compensada: $Q_C = NC(\%).Q_L$

c) Reatância capacitiva a 60 Hz no ramo sintonizado em h: $X_c^h = V^2 / (Q_c.Fd^h(\%))$

d) Capacitância no ramo sintonizado em h : $C^h = 1/\omega X_c^h$

e) Reatância indutiva a 60Hz para o ramo sintonizado em h : $X_L^h = X_C^h / h^2$

f) Indutância de sintonia para o ramo sintonizado em h: $L^h = X_L^h / \omega$

g) Resistência para o ramo sintonizado em h: $R^h = L^h / FQ$

Dimensionamento dos filtros	braço 1	Braço 2	Braço 3
Fator de qualidade dos reatores	50	50	50
Contribuição para correção do Fd (%)	33,33	33,33	33,33
Ordem harmônica de sintonia	5	7	11
Potência reativa capacitiva (pu)	-0,235	-0,235	-0,235
Reatância capacitiva para h=1 (pu)	4,261	4,260	4,260
Capacitância (F)	6,23E-04	6,23E-04	6,23E-04
Reatância indutiva para h=1 (pu)	0,170	0,087	0,035
Indutância (H)	4,52E-04	2,31E-04	9,34E-05
Resistência (pu)	9,04E-06	4,61E-06	1,87E-06

unesp

,UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Av. Brasil Centro, 56
15385-000 Ilha Solteira - SP
www.dee.feis.unesp.br