



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Ciências e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Elétrica

*Planejamento Ótimo de Filtros Harmônicos
Passivos em Sistemas de Distribuição de
Energia Elétrica:
Uma Abordagem com Algoritmos Evolutivos.*

Tese de Doutorado

Franklin Martins Pereira Pamplona

Campina Grande – Paraíba – Brasil
Março de 2006.

Franklin Martins Pereira Pamplona

*Planejamento Ótimo de Filtros Harmônicos Passivos em
Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica: Uma
Abordagem com Algoritmos Evolutivos.*

*Tese apresentada à Coordenação do Programa de
Pós-graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande, em
cumprimento parcial às exigências para obtenção
do Grau de Doutor em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento da Energia

Benemar Alencar de Souza, D.Sc.

Orientador

Campina Grande – Paraíba – Brasil
Março de 2006.

P _____
2005

Pamplona, Franklin Martins Pereira

Planejamento Ótimo de Filtros Harmônicos
Passivos em Sistemas de Distribuição de Energia
Elétrica: Uma Abordagem com Algoritmos Evolutivos
/ Franklin M. P. Pamplona – Campina Grande: UFCG,
2005.

110 p.

Inclui Bibliografia.

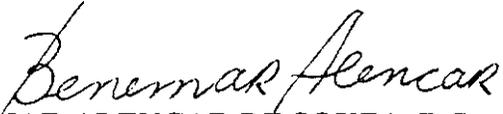
Tese (doutorado) – UFCG/CCT.

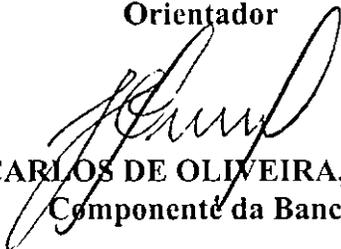
1. Engenharia Elétrica – Sistemas de Distribuição
2. Algoritmos Evolutivos
3. Qualidade de Energia Elétrica
4. Filtros harmônicos passivos.

**PLANEJAMENTO ÓTIMO DE FILTROS HARMÔNICOS PASSIVOS EM SISTEMAS
DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: UMA ABORDAGEM COM
ALGORÍTMOS EVOLUTIVOS**

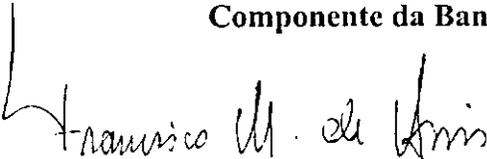
FRANKLIN MARTINS PEREIRA PAMPLONA

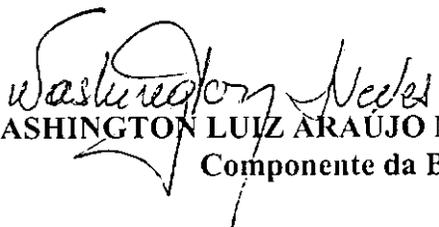
Tese Aprovada em 10.03.2006


BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG
Orientador


JOSÉ CARLOS DE OLIVEIRA, Ph.D., UFU
Componente da Banca

PAULO F. RIBEIRO, Ph.D., Calvin College (USA)
Componente da Banca


FRANCISCO MARCOS DE ASSIS, Dr., UFCG
Componente da Banca


WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE – PB
Março - 2006

À Any Rose, minha mulher amada,
aos meus filhos Vitor e Isabela e
à minha mãe Amara Lúcia,

DEDICO.

“... se variações úteis para qualquer organismo devam ocorrer para que ele venha a existir, certamente indivíduos assim caracterizados terão a melhor chance de serem preservados na luta por sobrevivência; e do forte princípio de hereditariedade, eles tenderão a produzir gerações com características similares. Este princípio de preservação, eu batizei, para ser sucinto, de Seleção Natural.”

(Darwin, 1859)

Agradecimentos

Meus sinceros agradecimentos:

- À Coordenação de Pós-graduação de Engenharia Elétrica (COPELE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Alagoas (CEFET-AL) pela oportunidade de realizar o curso de pós-graduação e este trabalho de tese.
- Ao professor, orientador e amigo Benemar Alencar de Souza, pelo contínuo estímulo e incentivo, por sua compreensão e confiança em mim depositadas e por suas importantes sugestões no desenvolvimento deste trabalho.
- Ao professor Washington L. A. Neves, por seu apoio, incentivo e amizade.
- Aos amigos e colegas de doutorado, Hélivio, Luciano, Helon, Ângelo, José Antônio, Estácio e Diana; e aos professores Damásio Fernandes Júnior e Núbia Silva Dantas Brito, pelas prolíficas discussões, companheirismo e amizade.
- A todos os amigos e colegas da coordenadoria do curso de Eletrotécnica do CEFET-AL por terem possibilitado meu afastamento para realização deste trabalho.
- Aos funcionários da COPELE e Miniblibio pelos excelentes serviços prestados, especialmente à Ângela e Eleonôra.
- Aos membros da banca examinadora, pelas sugestões e críticas construtivas.
- Ao CNPq, pelo apoio financeiro.
- À minha mãe Amara, pelo amor e fé incondicionais, pelo exemplo de vida e ideais verdadeiros e por muitas das boas oportunidades que tive na vida.
- À minha amada Any Rose e aos meus filhos Vitor e Isabela, pelo carinho, amor, compreensão e dedicação.
- Ao meu irmão Lincoln, pelo apoio irrestrito.
- À Deus, por tudo.

Sumário

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	x
Lista de Símbolos	xi
Resumo	xiv
Abstract	xv
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Motivação do Trabalho	4
1.2 Objetivo e Contribuições da Tese	5
1.3 Metodologia	6
1.4 Organização do Trabalho	8
Capítulo 2 – Estado da Arte	9
2.1 Projeto ótimo de filtros harmônicos passivos	10
2.2 Estratégias para o planejamento de filtros harmônicos passivos em sistemas de distribuição	11
2.3 Métodos heurísticos aplicados ao planejamento de filtros harmônicos passivos em sistemas de distribuição	13
2.4 Resumo	17
Capítulo 3 – Planejamento Ótimo de Filtros Harmônicos Passivos	19
3.1 Características e modelagem do sistema de distribuição	23
3.2 Determinação do fluxo de harmônicas	24
3.3 Determinação do fluxo de carga	26
3.4 Modelos dos componentes do sistema	27
3.4.1 Linhas aéreas de distribuição	27

3.4.2	Transformadores	29
3.4.3	Bancos de capacitores	29
3.4.4	Cargas lineares.....	30
3.4.5	Cargas não lineares	32
3.5	Filtros harmônicos passivos	34
3.5.1	Parâmetros dos filtros sintonizados	35
3.5.2	Cálculo dos componentes do filtro	37
3.5.3	Restrições gerais no projeto de filtros.....	38
3.6	Índices de Distorção Harmônica.....	40
3.7	Limites de Distorção Harmônica	40
Capítulo 4 – Introdução aos Algoritmos Evolutivos		43
4.1	Introdução.....	43
4.2	Terminologia	45
4.3	O Algoritmo Genético Simples	46
4.3.1	Codificação.....	47
4.3.2	Inicialização.....	48
4.3.3	Avaliação da população	48
4.3.4	Reprodução	49
4.3.5	Renovação da população	53
4.3.6	Critério de parada	53
4.4	O Algoritmo Microgenético.....	53
Capítulo 5 – Algoritmos Propostos		56
5.1	Codificação dos parâmetros do problema.....	56
5.2	Função de adaptação	58
5.3	O algoritmo genético implementado	61
5.4	Características do algoritmo microgenético implementado	63
Capítulo 6 – Estudos de Casos		65
6.1	Sistema teste.....	66
6.2	Validação das rotinas de fluxo de carga e de harmônicas	68
6.3	Caso 1 - Variações do Algoritmo Evolutivo Aplicado e dos Parâmetros da Função <i>fitness</i>	69

6.3.1	Parâmetros dos algoritmos genético e microgenético.....	71
6.3.2	Resumo dos resultados.....	72
6.4	Caso 2 – Variações das cargas lineares e não lineares	75
6.4.1	Condições analisadas.....	76
6.5	Caso 3 – Variações na Modelagem das Cargas Lineares.....	81
6.6	Caso 4 – Variações da estratégia de alocação dos filtros	82
6.7	Caso 5 – Avaliação de desempenho para um sistema de 232 barras.....	85
Capítulo 7 – Considerações Finais		88
7.1	Conclusões	88
7.2	Limitações do trabalho	90
7.3	Propostas para Trabalhos Futuros.....	91
Referências Bibliográficas		92
Apêndice A		99
Apêndice B.....		106

Lista de Figuras

Figura 1. Fluxograma do procedimento geral do método de planejamento proposto.....	22
Figura 2. Exemplo de um alimentador radial de 15 barras.	23
Figura 3. Detalhamento de um trecho genérico, i , de um alimentador radial.....	26
Figura 4. Modelos empregados na representação de cargas lineares.	31
Figura 5. Curvas de carga, duração de carga e curva segmentada correspondente.....	32
Figura 6. Filtros harmônicos passivos típicos.....	35
Figura 7. Fluxograma de um Algoritmo Genético Simples.....	47
Figura 8. Exemplo de uma seleção pelo método da <i>roleta ponderada</i>	50
Figura 9. Exemplo de um cruzamento simples.....	52
Figura 10. Operador de mutação aleatória atuando em um gene.	52
Figura 11. Fluxograma de um Algoritmo Microgenético.	54
Figura 12. Estrutura de um cromossomo para projeto de 3 filtros harmônicos em barras distintas do sistema.	57
Figura 13. Estrutura de um cromossomo para projeto de 3 filtros harmônicos numa única barra do sistema.	58
Figura 14. Fluxograma do cálculo da função de adaptação.	61
Figura 15. Fluxograma do algoritmo genético implementado.	62
Figura 16. Fluxograma do algoritmo microgenético implementado.	64
Figura 17. Sistema de distribuição radial de 18 barras.	66
Figura 18. Comparação dos resultados de fluxo de potências.....	68
Figura 19. Comparação dos resultados de fluxo de harmônicas.....	69
Figura 20. Tensões e $DHTv$ na configuração original do sistema - estudo de caso 1.....	70
Figura 21. Perfil de tensão com aplicação dos filtros - estudo de caso 1.....	74
Figura 22. $DHTv$ no sistema com aplicação dos filtros - estudo de caso 1.	74

Figura 23. Tensões no sistema considerando cargas lineares variáveis e injeções de harmônicas constantes – estudo de caso 2(b).	77
Figura 24. $DHTv$ no sistema considerando cargas lineares variáveis e injeções de harmônicas constantes – estudo de caso 2(b).	77
Figura 25. $DHTv$ no sistema considerando a mesma variação de cargas lineares e não lineares – estudo de caso 2(c).	78
Figura 26. $DHTv$ no sistema considerando cargas lineares e não lineares variáveis, com aplicação dos filtros sintonizados – estudo de caso 2(c).	80
Figura 27. $DHTv$ no sistema para o caso (c), considerando a solução de filtros do caso (b) – estudo de caso 2.	80
Figura 28. $DHTv$ no sistema com uso de diferentes modelos de cargas – estudo de caso 3.	81
Figura 29. $DHTv$ no sistema com uso de diferentes estratégias no planejamento dos filtros – estudo de caso 4.	84
Figura 30. Tensões no sistema com uso de diferentes estratégias no planejamento dos filtros – estudo de caso 4.	84
Figura 31. $DHTv$ no sistema de 232 barras – estudo de caso 5.	86
Figura 32. Perfil de tensão no sistema de 232 barras – estudo de caso 5.	87

Lista de Tabelas

Tabela 1. Quadro resumo da revisão bibliográfica.....	18
Tabela 2. Limites de distorção harmônica de tensão propostos pelo IEEE Standard 519...	40
Tabela 3. Limites de distorção harmônica de tensão estabelecidos pela ANEEL.	41
Tabela 4. Limites de distorção harmônica de tensão estabelecidos pelo ONS.	41
Tabela 5. Dados de linha do sistema de 18 barras.	66
Tabela 6. Dados de carga linear, carga não linear e bancos de capacitores do sistema de 18 barras.....	67
Tabela 7. Espectro das correntes harmônicas.	67
Tabela 8. Tensões e $DHTv$ na configuração original do sistema - estudo de Caso 1.....	70
Tabela 9. Resumo dos resultados obtidos no estudo de caso 1.....	72
Tabela 10. Parâmetros dos filtros harmônicos - estudo de caso 1.	73
Tabela 11. Fatores correspondentes à curva de carga adotada no estudo de caso 2.	75
Tabela 12. Resumo dos resultados obtidos no estudo de caso 2.....	79
Tabela 13. Parâmetros dos filtros harmônicos - estudo de caso 2.	79
Tabela 14. Resumo dos resultados obtidos no estudo de caso 3.....	82
Tabela 15. Resumo dos resultados obtidos no estudo de caso 4.....	83
Tabela 16. Resumo dos resultados obtidos no estudo de caso 5.....	86
Tabela 17. Dados de linha do sistema teste de 232 barras.	99
Tabela 18. Dados de barra do sistema teste de 232 barras.....	102
Tabela 19. Dados de carga não linear do sistema de 232 barras.	105
Tabela 20. Espectro das correntes harmônicas das cargas não lineares do sistema de 232 barras.	105

Lista de Símbolos

- h - ordem de frequência harmônica (na frequência fundamental do sistema, $h = 1$)
- \mathbf{Y}^h - matriz admitância do sistema de distribuição, na frequência harmônica de ordem h
- \mathbf{V}^h - vetor de tensões harmônicas nas barras terminais de todos os trechos do sistema de distribuição, na frequência harmônica de ordem h
- \mathbf{I}^h - vetor de correntes harmônicas injetadas nas barras terminais de todos os trechos do sistema de distribuição, na frequência harmônica de ordem h
- V_i^h - módulo da tensão na barra terminal do i -ésimo trecho do sistema de distribuição, na frequência harmônica de ordem h
- I_i^h - módulo da corrente harmônica relativa à carga não linear instalada na barra terminal do i -ésimo trecho do sistema de distribuição, na frequência harmônica de ordem h
- P_i - potência ativa total na barra terminal do i -ésimo trecho do sistema de distribuição
- Q_i - potência reativa total na barra terminal do i -ésimo trecho do sistema de distribuição
- \bar{P}_i - potência ativa da carga linear instalada na barra terminal do i -ésimo trecho do sistema de distribuição
- \bar{Q}_i - potência reativa de carga linear instalada na barra terminal do i -ésimo trecho do sistema de distribuição
- \tilde{P}_i - potência ativa da carga não linear instalada na barra terminal do i -ésimo trecho do sistema de distribuição

- \tilde{Q}_i - potência reativa da carga não linear instalada na barra terminal do i -ésimo trecho do sistema de distribuição
- p_i - fluxo total de potência ativa no i -ésimo trecho do sistema de distribuição
- q_i - fluxo total de potência reativa no do i -ésimo trecho do sistema de distribuição
- y_{Li}^h - admitância equivalente do i -ésimo trecho do sistema de distribuição, na frequência harmônica de ordem h
- y_{Ti}^h - admitância equivalente do transformador instalado no i -ésimo trecho do sistema de distribuição, na frequência harmônica de ordem h
- y_{Ci}^1 - admitância equivalente do banco de capacitores na barra terminal do i -ésimo trecho do sistema de distribuição, na frequência fundamental do sistema
- y_{Ci}^h - admitância equivalente do banco de capacitores na barra terminal do i -ésimo trecho do sistema de distribuição, na frequência harmônica de ordem h
- y_{LLi}^h - admitância equivalente da carga linear instalada na barra terminal do i -ésimo trecho do sistema de distribuição, na frequência harmônica de ordem h
- y_{Fi}^h - admitância equivalente da filtro harmônico sintonizado, instalado na barra terminal do i -ésimo trecho do sistema de distribuição, na frequência harmônica de ordem h
- R_{Li} - resistência do i -ésimo trecho do sistema de distribuição
- X_{Li} - reatância indutiva do i -ésimo trecho do sistema de distribuição
- R_{Ti} - resistência equivalente do transformador instalado no i -ésimo trecho do sistema de distribuição
- X_{Ti} - reatância indutiva equivalente (de curto-circuito) do transformador instalado no i -ésimo trecho do sistema de distribuição
- X_{Ti} - reatância indutiva equivalente (de curto-circuito) do transformador instalado no i -ésimo trecho do sistema de distribuição
- $f_{c_{np}}$ - fator de carga correspondente ao patamar de carga np .
- $C_i(h)$ - percentual correspondente ao espectro típico da carga não linear instalada no i -ésimo trecho do sistema de distribuição, na frequência harmônica h .

- Z_f^h - impedância de um filtro harmônico sintonizado, na frequência harmônica h
- R_f - resistência de um filtro harmônico sintonizado
- X_{Lf}^h - reatância indutiva de um filtro harmônico sintonizado, na frequência harmônica h
- X_{Cf}^h - reatância capacitiva de um filtro harmônico sintonizado, na frequência harmônica h
- f_s - frequência de sintonia de um filtro harmônico sintonizado
- h_s - ordem harmônica de sintonia de um filtro harmônico sintonizado
- L_f - indutância nominal (de projeto) de um filtro harmônico sintonizado
- C_f - capacitância nominal (de projeto) de um filtro harmônico sintonizado
- f_Q - fator de qualidade de um filtro harmônico sintonizado
- Q_C - capacidade nominal dos módulos capacitivos disponíveis para composição dos filtros harmônicos sintonizados
- k_j - número de módulos capacitivos que compõe o j -ésimo filtro harmônico sintonizado
- Q_F^1 - capacidade reativa nominal (de projeto) de um filtro harmônico sintonizado, na frequência fundamental do sistema
- V_{Cf}^1 - tensão aplicada sobre o componente capacitivo de um filtro, na frequência fundamental
- I_f^h - corrente veiculada através do filtro harmônico sintonizado, na frequência harmônica h
- P_F - potência dissipada nos componentes resistivos do filtro harmônico sintonizado
- $DHIv_i$ - distorção harmônica individual de tensão
- $DHTv_i$ - distorção harmônica total de tensão

Resumo

A instalação de filtros harmônicos passivos é uma solução clássica para a redução de correntes harmônicas em sistemas de distribuição de energia elétrica. Contudo, o planejamento de múltiplos filtros harmônicos em sistemas de distribuição não é uma tarefa trivial, devido às características peculiares das cargas e do próprio sistema de distribuição. Diante do estado da arte, a presente tese apresenta o desenvolvimento de um algoritmo para realizar o planejamento ótimo de múltiplos filtros harmônicos passivos em sistemas de distribuição radiais, aplicando algoritmos evolutivos para minimizar as distorções harmônicas totais de tensão no sistema de distribuição, e satisfazer, ao mesmo tempo, as condições normais de operação do sistema. O algoritmo desenvolvido destaca-se pela capacidade de aplicar simultaneamente: algoritmos evolutivos que proporcionam a determinação rápida e eficaz de soluções factíveis para o problema de otimização envolvido no planejamento de filtros harmônicos passivos; o emprego de uma função *fitness* que possibilita a incorporação de múltiplos objetivos durante o processo de otimização; um algoritmo otimizado para a análise de harmônicas em sistemas radiais, com a utilização modelos compatíveis com dados normalmente disponíveis na prática; diferentes modelos de cargas lineares; consideração das variações de carga lineares e não lineares; e a aplicação de diferentes estratégias no planejamento dos filtros passivos.

Abstract

The use of passive harmonic filters is a classic solution to reduce the harmonic distortion in electric distribution systems. However, the planning of multiple harmonic filters in distribution systems is not a simple task, due the particular characteristics of loads and distribution system. At present state of art, this thesis show the developing of an algorithm to realize the optimal planning of multiple passive harmonic filters in radial distribution systems, using evolutionary algorithms to minimize the total voltage harmonic distortion, and satisfy, at same time, the normal operational conditions. The developed algorithm stand out by use, simultaneously: optimized evolutionary algorithms that find possible solutions of the passive harmonic planning optimization problem; the use of multiobjective fitness function in the optimization process; an optimized algorithm to harmonic analysis in radial systems, with application of models compatible with practical data; different models of linear load; consideration of linear and nonlinear load variations; and the application of different strategies on the planning of passive harmonic filters.

Capítulo 1

Introdução

A utilização de cargas com características não-lineares e de equipamentos com chaveamento eletrônico em residências, instalações comerciais e pequenas indústrias é crescente. Tais cargas e equipamentos provocam distúrbios harmônicos que se propagam no sistema elétrico de distribuição.

Os distúrbios harmônicos são fenômenos contínuos e periódicos de regime permanente. Na presença destes, a forma de onda de tensão e corrente do sistema elétrico é substancialmente diferente de uma onda senoidal pura. Esta onda distorcida pode ser considerada como sendo composta por infinitas ondas senoidais com frequências múltiplas da frequência da rede, as harmônicas.

Segundo Task Force on Harmonic Modeling and Simulation (1996), as principais fontes de distúrbios harmônicos nos sistemas elétricos de potência podem ser agrupadas em dois grandes grupos: dispositivos de chaveamento eletrônico, onde há um processo de chaveamento que é geralmente sincronizado para a frequência da rede, típicos de dispositivos como: conversores estáticos de potência, inversores de frequência, controladores de velocidade, acionamentos a tiristores, retificadores, conversores eletrônicos de potência, entre outros; e dispositivos com relação de corrente e tensão não-linear, que leva à produção de correntes harmônicas, quando excitados com uma tensão de entrada periódica.

Exemplos típicos desta categoria são: reatores saturados, fornos de indução e a arco, máquinas de solda a arco e máquinas rotativas. A natureza e a amplitude das harmônicas geradas por estas cargas são muito específicas.

O grau com que as harmônicas podem ser toleradas em um sistema de alimentação depende da susceptibilidade da carga ou da fonte de potência. Os equipamentos menos sensíveis, geralmente, são os de aquecimento (carga resistiva), para os quais a forma de onda não é relevante. Os mais sensíveis são aqueles que, em seu projeto, assumem a existência de uma alimentação senoidal como, por exemplo, equipamentos de comunicação e processamento de dados. No entanto, mesmo para as cargas de baixa susceptibilidade, a presença de harmônicas de tensão ou de corrente podem ser prejudiciais, produzindo maiores esforços nos componentes e isolantes (IEEE STANDARD 519, 1993).

As correntes e tensões harmônicas sobrepostas na fundamental produzem efeitos danosos em equipamentos e dispositivos ligados à rede de alimentação. Segundo IEEE Task Force on the Effects of Harmonics on Equipments (1993), esses efeitos danosos dependem do tipo de carga e se dividem em: efeitos instantâneos e efeitos de médio e longo prazo.

Os efeitos instantâneos podem perturbar controladores usados em sistemas eletrônicos, afetando, por exemplo, as condições de chaveamento de tiristores, ou causar erros adicionais em medidores elétricos de indução; causar vibrações e ruído acústico, especialmente em dispositivos eletromagnéticos; ou ainda, provocar interferência em circuitos de comunicação e de controle quando instalados próximos de linhas de potência com ondas distorcidas.

Entre os efeitos de médio e longo prazo destacam-se a fadiga mecânica causada pelas vibrações e, principalmente, o aquecimento de dispositivos. O aquecimento provocado pelas harmônicas pode causar um colapso dielétrico em capacitores; perdas adicionais nos estatores e rotores de máquinas rotativas, bem como em transformadores; aumento de perdas de energia em cabos e equipamentos de uma forma geral (IEEE WORKING GROUP ON POWER SYSTEM HARMONICS, 1983).

Além do possível em acréscimo de perdas e perda de vida útil de equipamentos, a propagação de correntes harmônicas em sistemas de potência também pode resultar na ocorrência de ressonâncias, cujas sobrecorrentes e sobretensões resultantes também podem provocar a danificação de equipamentos. Adicionalmente, a propagação de correntes harmônicas também pode interferir em equipamentos de controle, comunicação, e proteção (IEEE TASK FORCE ON THE EFFECTS OF HARMONICS ON EQUIPMENT, 1993).

Por isso, a busca por soluções para a redução da propagação de correntes harmônicas nos sistemas de potência tem se tornado um problema de interesse crescente. Há diversas formas de se tentar reduzir ou eliminar as harmônicas num sistema, dentre elas, destacam-se as aplicações de filtros passivos e ativos.

A solução mais empregada em sistemas industriais e de distribuição de energia elétrica é o uso de filtros harmônicos passivos, por sua robustez, confiabilidade e custo acessível. Estes filtros consistem basicamente de um circuito em derivação composto da ligação de resistores, indutores e capacitores, cujos parâmetros são mutuamente dependentes e calculados para a frequência de sintonia do filtro. Para redução de harmônicas de ordens triplas, como as de 3^a, 9^a e 15^a ordens, filtros eletromagnéticos de construção especial – compensadores eletromagnéticos – têm-se mostrado muito eficientes (APOLÔNIO et al, 2003). A distinção entre os filtros passivos e os filtros eletromagnéticos está no fato de que apenas elementos eletromagnéticos estão presentes na última alternativa.

Os filtros harmônicos ativos empregam dispositivos de eletrônica de potência para injetar harmônicas com 180 graus de defasagem em relação às harmônicas das cargas não lineares, com o intuito de manter a distorção harmônica dentro de uma tolerância aceitável. Estes dispositivos são projetados para monitorar continuamente a corrente da rede e detectar as componentes de distorção a serem canceladas. Apesar de eliminar alguns efeitos adversos próprios de filtros passivos – tais como o envelhecimento de componentes e problemas de ressonância – e de sua eficácia ser maior frente às variações de carga, os filtros ativos não têm sido muito aplicados em sistemas de distribuição. Principalmente

devido ao seu alto custo em comparação aos filtros passivos de mesma capacidade, das interferências eletromagnéticas e altas perdas de potência (ZHAO et al, 2004).

1.1 Motivação do Trabalho

Os filtros passivos sintonizados são os mais utilizados pelas concessionárias de energia elétrica por serem os mais simples e de menor custo, além de contribuírem no suprimento de potência reativa (KAWANN e EMANUEL, 1996). Todavia, para que um filtro passivo apresente um desempenho satisfatório, ele deve ser cuidadosamente dimensionado, face sua sensibilidade em relação às impedâncias do sistema ao qual está conectado (DAS, 2004).

Na literatura encontram-se diversos estudos e métodos de planejamento de filtros passivos em sistemas de potência, principalmente na aplicação de filtros em uma única barra do sistema (HARTANA e RICHARDS, 1992; YAN et al, 1994; HONG e HUANG, 2003). No caso da instalação de múltiplos filtros em sistemas típicos de distribuição, a situação é diferente (ORTMEYER e HIYAMA, 1996).

Os sistemas de distribuição caracterizam-se por apresentar um grande número de cargas de pequena potência, dos mais diversos tipos e características, de constante variação ao longo do dia. Também é comum a presença de bancos de capacitores fixos e chaveados, responsáveis pela compensação reativa no sistema. Isto faz com que as impedâncias e as correntes harmônicas injetadas no sistema também variem constantemente, aumentando a dificuldade na especificação dos parâmetros de um filtro harmônico e o estabelecimento de sua localização no alimentador, de forma a atender satisfatoriamente as diversas condições impostas pelo sistema.

Além disso, em muitos casos, a aplicação de um único filtro passivo não é suficiente para controlar os níveis de correntes harmônicas, impondo uma dificuldade ainda maior ao problema, pois a presença de vários filtros numa

mesma rede produz interferências mútuas, com o resultado de que cada filtro pode facilmente ser influenciado pela presença dos outros filtros e outras cargas.

Dessa forma, o planejamento de múltiplos filtros em sistemas típicos de distribuição constitui-se um problema não linear, sujeito a diversas restrições práticas.

Torna-se imperativo realizar estudos mais detalhados, que devem considerar as múltiplas fontes harmônicas presentes no sistema, a possibilidade de ocorrência de ressonâncias, as restrições operacionais do sistema, as variações de carga, e o projeto ótimo de cada filtro harmônico.

Na literatura são poucos os estudos que abordam o planejamento de filtros considerando simultaneamente todos os aspectos enumerados acima (CHANG et al, 2004). Os estudos apresentados até o momento fazem uso de diversas simplificações, seja nos métodos de análise das harmônicas (CHANG et al, 2002a), nos algoritmos de otimização para localização ótima dos filtros (ORTMEYER e HIYAMA, 1996), na representação dos sistemas de distribuição (CHANG e CHANG, 1998), ou nas considerações de projeto dos filtros. Portanto, persiste a necessidade de maiores investigações para a solução do problema que se apresenta.

1.2 Objetivo e Contribuições da Tese

O objetivo desta tese é desenvolver um algoritmo para realizar o planejamento ótimo de múltiplos filtros harmônicos passivos em sistemas de distribuição radiais, de forma a minimizar as distorções harmônicas totais de tensão em todas as barras do sistema de distribuição. As contribuições da tese para o estado da arte serão essencialmente:

- Aplicação de algoritmos evolutivos com eficiência computacional o suficiente para torná-los aplicáveis a sistemas realistas de distribuição radial de grandes dimensões, proporcionando a determinação de

soluções factíveis para o planejamento de filtros harmônicos passivos em sistemas de distribuição.

- Concepção de uma estrutura cromossômica baseada em codificação binária compacta e de alta eficiência e aplicação de uma função *fitness* que possibilita a incorporação de múltiplos objetivos durante o processo de otimização combinatória.
- Incorporação de diferentes modelos de cargas lineares, para uma representação mais precisa das cargas existentes no sistema de distribuição.
- Consideração das variações de carga lineares e não lineares, utilizando as informações das curvas de carga dos alimentadores levantadas na subestação e as medições efetuadas para caracterização das cargas não lineares.
- Aplicação de diferentes estratégias no planejamento dos filtros passivos.
- Implementação de um algoritmo rápido e eficiente para a análise de harmônicas em sistemas radiais de distribuição, com utilização de modelos compatíveis com dados normalmente disponíveis na prática.

1.3 Metodologia

O planejamento de filtros harmônicos passivos em sistemas de distribuição é formulado como um problema de otimização, onde se procura minimizar uma função objetivo definida para contabilizar as distorções harmônicas tensão no sistema. O problema também é formulado como multiobjetivo, pois procura soluções que satisfazem ao menos dois atributos: a minimização das distorções harmônicas de tensão e redução das perdas. Contudo, aplica-se um método simples para sua solução, através do uso de ponderações na função objetivo. Como é possível existir mais de uma solução factível, que dependerá dos atributos adotados, a solução proposta não está focando esforços somente na obtenção do ótimo global, mas de uma solução factível, muito próxima ou igual ao ótimo

global. Também são incluídas restrições de ordem prática, tais como a avaliação de variações nos parâmetros dos filtros.

Na modelagem do problema, os valores de capacidade reativa e de pontos de instalação dos filtros são discretizados. Como conseqüência, a otimização proposta é de natureza combinatória. Geralmente as soluções possíveis são em número tão grande que a enumeração completa é impraticável. Se, por exemplo, estiver sendo cogitada a instalação de três filtros passivos, compostos por apenas uma unidade capacitiva, em cada uma das 20 barras de um pequeno alimentador, o espaço de decisões terá uma dimensão de 4^{20} correspondem a um arranjo com repetições das quatro possibilidades de alocação por barra (0, 1, 2 ou 3 filtros). Fica evidente a dificuldade prática de processar todo o espaço de decisões, uma vez que o problema é exponencial e não polinomial. Para lidar com esse problema, se recorreu ao uso de ferramentas de meta-heurística inspiradas na evolução das espécies, os algoritmos evolutivos.

Os algoritmos evolucionários lidam com um conjunto de soluções a serem aperfeiçoadas a cada geração. Cada solução proposta necessita ser avaliada, ao custo de um considerável tempo de processamento. Neste trabalho, foram implementados algoritmos genéticos e microgenéticos simples, com parâmetros otimizados para a solução do problema apresentado. Também foram desenvolvidas rotinas específicas para processar os fluxos de potência e de harmônicas, com o intuito de melhorar a eficiência geral do algoritmo de planejamento. Isto também tornou possível agregar aspectos adicionais de modelagem das cargas e demais componentes do sistema de distribuição, utilizando os dados normalmente disponíveis na prática. Podem-se variar diversos parâmetros do algoritmo desenvolvido para controlar seu processamento dentro de um tempo viável e do nível de conhecimento das características do sistema em estudo.

1.4 Organização do Trabalho

Um breve resumo de cada capítulo é descrito a seguir:

No capítulo 1 se apresentam uma introdução ao tema desta tese, caracterizando o problema, a sua motivação, objetivos a serem alcançados e um resumo da metodologia proposta.

No capítulo 2 se apresenta o estado da arte por meio de uma concisa revisão da literatura sobre os trabalhos que tratam do planejamento de filtros harmônicos passivos em sistemas de distribuição.

O problema abordado neste trabalho é detalhado no capítulo 3. Descrevem-se os métodos utilizados para sua solução e se apresentam os métodos implementados de análise do fluxo de harmônicas e de solução do fluxo de cargas, juntamente com os modelos de cada componente do sistema empregados no algoritmo de fluxo de harmônicas.

No capítulo 4 apresentam-se os conceitos gerais sobre algoritmos evolutivos. Em seguida, detalham-se as etapas e principais características dos algoritmos genéticos e microgenéticos. Os detalhes dos algoritmos evolutivos propostos e implementados são apresentados no capítulo 5.

No capítulo 6 apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos com os algoritmos desenvolvidos para diversos estudos de caso, com a aplicação a um sistema de distribuição com dois alimentadores radiais. Também é avaliado o desempenho do algoritmo para um alimentador de grandes dimensões.

No capítulo 7 apresentam-se as conclusões finais e limitações desse trabalho. Indicam-se também propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estado da Arte

A aplicação de filtros harmônicos passivos para redução de distúrbios harmônicos em sistemas elétricos não é novidade. Na literatura encontram-se estudos correlatos a esse assunto anteriores à década de 1980, embora a revisão do estado da arte aqui apresentado limite-se aos trabalhos posteriores a essa época.

Há três linhas gerais de estudo relacionadas ao planejamento de filtros harmônicos passivos em sistemas de distribuição. Uma enfoca o projeto ótimo de filtros harmônicos passivos. Outra, as estratégias para a redução de distúrbios harmônicos em sistemas de distribuição e a última, a aplicação de métodos heurísticos no planejamento ótimo de filtros passivos em sistemas de distribuição.

Apresenta-se a seguir uma revisão bibliográfica nestas linhas gerais de estudo, delineando-se o estado da arte. A ênfase maior é dada aos estudos de aplicação de métodos heurísticos no planejamento ótimo de filtros passivos em sistemas de distribuição, que é a linha de estudo a qual se insere o presente trabalho.

2.1 Projeto ótimo de filtros harmônicos passivos

O enfoque principal nos trabalhos da década de 1980 é o estudo de diferentes tipos de filtros passivos e o projeto ótimo de seus parâmetros (DUGAN e KO, 1984; GONZALEZ e McCALL, 1987; MONTANARI e LOGGINI, 1988). A grande limitação desses trabalhos é considerar a existência de uma única carga injetora de harmônicas no sistema, e de uma única barra do sistema para a localização dos filtros - usualmente, a barra com maior fator de distorção harmônica de tensão (RICHARDS et al, 1989; TANG e MAHMUD, 1989; NGUYEN, 1992).

Estudos posteriores passaram a considerar a existência de múltiplas fontes harmônicas e variações nas características do sistema, seja pelo chaveamento de capacitores, modificação no carregamento do sistema, ou ainda alterações nos parâmetros dos filtros provocados pela ação da temperatura, ou envelhecimento de componentes (MAKRAM et al, 1993; LIN et al, 1998).

Os trabalhos mais recentes sobre o projeto ótimo de filtros passivos têm formulado o problema como um problema de otimização combinatória, e aplicado métodos heurísticos na sua solução. Para tanto, define-se uma função objetivo (geralmente uma função de custo) sujeita a restrições, a qual é minimizada aplicando-se um algoritmo heurístico, como resfriamento simulado (*simulated annealing*) (CHOU et al, 2000), algoritmos genéticos (MOURA et al, 2002), ou lógica *fuzzy* combinada com algoritmos genéticos (HONG e HUANG, 2003).

Das (2004) apresenta as potencialidades e limitações dos filtros harmônicos sintonizados e dos filtros amortecidos de segunda ordem, discutindo os aspectos mais comuns de projeto para cada tipo de filtro. Neste trabalho apresentam-se e discutem-se as etapas comumente utilizadas no planejamento de filtros, sendo apresentadas as limitações que devem ser respeitadas na fase de projeto para obter-se um desempenho satisfatório dos filtros harmônicos passivos. O dimensionamento da capacidade dos filtros, por exemplo, deve considerar, além das necessidades de compensação reativa do circuito, a ocorrência de

ressonâncias, os efeitos da frequência de sintonia, a dessintonia do filtro devido à fatores ambientais (como a ação da temperatura) e de variações nos parâmetros dos filtros e as limitações práticas dos equipamentos.

Os efeitos do fator de qualidade na eficiência e nas perdas dos filtros harmônicos sintonizados são discutidos por Czarnecki e Ginn (2004). Estes mesmos autores (CZARNECKI e GINN, 2005) também apresentaram um estudo sobre a influência do método de projeto na eficiência dos filtros harmônicos sintonizados. É mostrado que os métodos tradicionais de projeto deixam uma margem considerável para melhoria da eficiência dos filtros sintonizados, recomendando-se aplicar métodos de otimização no projeto dos filtros.

2.2 Estratégias para o planejamento de filtros harmônicos passivos em sistemas de distribuição

Na década de 1990, muitos trabalhos já constatavam que, na presença de distúrbios harmônicos, os bancos de capacitores (fixos ou chaveados) podem interagir com as indutâncias do sistema e provocar severos problemas de ressonância (HARTANA e RICHARDS, 1992). Surgiu assim uma das estratégias mais empregadas para solucionar este problema: realocar os bancos de capacitores no sistema, com o objetivo de reduzir as distorções harmônicas resultantes (CHUNG e LEUNG, 1999).

Nos casos em que não é possível manter os níveis de distorção harmônica dentro dos limites desejados apenas com a realocação dos capacitores, tornou-se comum empregar a estratégia de substituir os eventuais bancos ressonantes, por filtros passivos sintonizados, com compensação reativa equivalente, na frequência nominal do sistema.

Um exemplo é a estratégia proposta Hsu et al (1993), que desenvolveram um algoritmo para realizar o planejamento ótimo de compensação reativa em sistemas de distribuição com cargas não lineares.

No algoritmo desenvolvido por Hsu et al (1993), realiza-se inicialmente o planejamento ótimo de capacitores fixos, minimizando-se uma função objetivo que contabiliza os custos com perdas de potência e energia e os custos associados aos capacitores. Em seguida, aplica-se um fluxo de harmônicas para quantificar as distorções harmônicas nas barras do sistema. Dentre as barras que contém capacitores, identificam-se àquelas que violam os limites de distorção harmônica pré-estabelecidos. Nas barras selecionadas, o algoritmo procede à substituição dos capacitores por filtros passivos, determinando seus parâmetros para a condição de carga máxima.

YAN et al (1994) apresentam um algoritmo semelhante, e mostram resultados de aplicação a um sistema industrial real, cujas características de distorção harmônica foram medidas e registradas a partir de ensaios de campo, e utilizadas para validar o algoritmo implementado no estudo.

Um conjunto de estratégias que devem ser empregadas no planejamento de filtros harmônicos em sistemas de distribuição radiais é apresentado por Ortmeier e Hiyama (1996). Eles propõem que o planejamento de compensação reativa seja realizado inicialmente, considerando-se apenas o comportamento do sistema em sua frequência nominal. Em seguida, recomendam realizar uma análise de harmônicas para identificar as barras ou alimentadores com maior nível de distorção harmônica e definir os pontos mais importantes para realizar medições de campo.

As medições de campo devem identificar as condições operacionais que produzem as maiores tensões harmônicas, e as condições de carga de pico, com todos os bancos de capacitores em atuação. Dessa forma, podem-se definir modelos adequados para as fontes de corrente harmônica do sistema.

O trabalho concatena e apresenta os resultados de diversos estudos, que mostram que a maioria das distorções encontradas nos sistemas primários de distribuição deve-se a harmônicas de 5^a, 7^a e 11^a ordens, devido ao alto grau de cancelamento das inúmeras cargas harmônicas presentes no sistema (EMANUEL et al, 1993; TOSTES et al, 2001). Assim, a maioria dos distúrbios harmônicos

presentes nos sistemas de distribuição pode ser minimizada com a aplicação de filtros de 5^o, 7^o e 11^o ordens. Os circuitos secundários de distribuição também são ricos em ordens harmônicas triplas (3^a, 9^a, 15^a ordens). Neste caso, filtros eletromagnéticos de construção especial (APOLÔNIO et al, 2003) têm-se mostrado muito promissores.

A estratégia recomendada por Ortmeyer e Hiyama (1996) para o planejamento dos filtros harmônicos é projetá-los da menor para a maior ordem harmônica, localizando-os nas barras que possuem bancos de capacitores e que apresentam os maiores índices de distorção harmônica individual de tensão. Nas barras escolhidas, substituem-se os bancos de capacitores por filtros passivos, com compensação reativa equivalente. No cálculo dos parâmetros de cada filtro, estimam-se as correntes que irão fluir nos mesmos. Recomenda-se, também, verificar as combinações de chaveamento de filtros e dos bancos de capacitores, para checar possíveis ressonâncias com o sistema, a fim de evitar a propagação de distúrbios transitórios elevados no sistema.

2.3 Métodos heurísticos aplicados ao planejamento de filtros harmônicos passivos em sistemas de distribuição

Com a constatação de que as técnicas convencionais de otimização, como os métodos de programação não linear, são de difícil aplicação no planejamento de múltiplos filtros em sistemas típicos de distribuição, diversos pesquisadores têm aplicado métodos heurísticos na solução do problema.

Nesse intuito, o planejamento ótimo de filtros passivos passou a ser tratado como um problema de otimização combinatória, onde se define uma função objetivo a ser minimizada por um determinado método heurístico.

Richards e Yang (1993) foram os primeiros a aplicar um método heurístico no planejamento ótimo de filtros harmônicos. Nesse trabalho, eles aplicaram um algoritmo genético simples para encontrar a combinação de chaveamento de capacitores, valores de cargas e de fontes harmônicas, que proporcionam os

maiores índices de distorção harmônica de tensão nas barras de um sistema de distribuição.

Richards e Yang (1993) também observaram que a convergência do algoritmo genético é lenta e que sua eficiência depende da eficiência com a qual se calcula a função objetivo.

Quando o pior cenário é encontrado, um filtro pode ser adicionado ao sistema interativamente, e a busca repetida, até que sejam atendidos os limites pré-estabelecidos de distorção harmônica de tensão.

Yang e Richards (1994) propuseram a localização automática dos filtros através de busca exaustiva, testando a instalação dos filtros em cada barra do sistema, o que acresceu excessivo custo computacional. Uma nova função objetivo também foi definida, mas os resultados foram bastante semelhantes ao trabalho anterior (RICHARDS e YANG, 1993).

Em ambos os trabalhos (RICHARDS e YANG, 1993; YANG e RICHARDS, 1994) não foram apresentados os métodos de cálculo do fluxo de harmônicas, nem os modelos empregados na representação dos componentes do sistema.

Chu et al (1994) desenvolveram um algoritmo baseado no método de *simulated annealing*, que determina as localizações, capacidades, e controle de filtros passivos (fixos ou chaveados) nos diferentes níveis de carga de um sistema de distribuição. Contudo, o algoritmo só considera apenas um único tipo de filtro passivo (fixo ou chaveado) a cada execução, e não considera a existência de bancos de capacitores no sistema. Assim, a compensação reativa do sistema é efetuada exclusivamente por filtros passivos.

O algoritmo emprega o método de *simulated annealing* em duas etapas. Na primeira, obtém-se a localização dos filtros e suas capacidades reativas totais. Na segunda etapa, obtém-se os valores de capacidade dos bancos para cada nível de carga, caso seja do tipo variável.

Para garantir a otimização dos parâmetros, o algoritmo emprega uma função objetivo, sujeita às restrições de limites de distorção harmônica e de

restrições operacionais, que contabiliza os custos associados à instalação dos filtros.

Outra limitação deste trabalho foi a de não considerar a presença de cargas harmônicas nas barras do sistema, mas a existência de distorção harmônica de tensão apenas na barra da subestação.

Chang e Chang (1998) estenderam e modificaram o algoritmo apresentado por Chu et al (1994), empregando fontes de corrente para representar o comportamento das cargas harmônicas nas barras do sistema, e aplicando o método da evolução diferencial como método heurístico de otimização combinatória.

Algumas modificações no método convencional de evolução diferencial foram implementadas para acelerar a convergência do algoritmo no processo de busca. As principais modificações propostas foram a criação de um processo de inicialização com soluções factíveis, a introdução de ruídos adicionais no processo de mutação para aumentar a diversidade da população, e a inclusão das restrições do problema como variáveis de penalidade na função de custo.

Algumas limitações observadas no trabalho de Chang e Chang (1998) são: adotar uma única frequência de sintonia no cálculo dos parâmetros de todos os filtros, e considerar apenas filtros passivos fixos na compensação reativa do sistema.

Berizzi e Bovo (2000) resolveram o problema do planejamento de filtros passivos empregando algoritmos genéticos e microgenéticos. A localização e dimensionamento dos componentes de cada filtro passivo foram tratados simultaneamente durante o processo de otimização da função objetivo. Isto foi possível através da codificação adotada para os cromossomos, que concatenam informações de localização, fator de qualidade e reatância dos filtros.

Foram pré-fixadas as informações do número de filtros e suas respectivas frequências de sintonia, e algumas alterações foram propostas para acelerar a convergência global do algoritmo.

Os resultados apresentados por Berizzi e Bovo (2000) mostram que os algoritmos microgenéticos apresentam soluções iguais às dos algoritmos genéticos, com menor tempo de execução. Contudo, Berizzi e Bovo (2000) não apresentaram o método empregado para o cálculo do fluxo de harmônicas, nem a modelagem utilizada para representar os componentes da rede. E a codificação adotada para o cromossomo, possibilita a obtenção de valores não padronizados de capacidade (em kvar), para os capacitores dos filtros. O algoritmo também não considera as informações da curva de carga do alimentador, nem a presença de bancos de capacitores chaveados no sistema.

Chang et al (2004) apresentaram um procedimento de duas etapas para realizar o planejamento de filtros passivos em sistemas de distribuição, considerando simultaneamente a redução das distorções harmônicas de tensão em todo o sistema e diversas restrições na obtenção dos parâmetros ótimos dos filtros.

No método apresentado por Chang et al (2004), determinam-se numa primeira etapa os pontos de instalação de cada filtro harmônico, através de análises de sensibilidade, entre as barras que contém bancos de capacitores.

Na etapa seguinte, os bancos de capacitores são substituídos por filtros passivos, cujos parâmetros são obtidos através de um algoritmo genético. Leva-se em conta as variações na frequência de sintonia dos filtros, os limites de tensão nos capacitores que compõem os filtros, e de corrente harmônica que fluem através dos indutores dos filtros. Contudo, o procedimento apresentado por Chang et al (2004) não considera as variações de carga do sistema, tampouco as variações de possíveis bancos de capacitores chaveados. Também não são explicitados os modelos adotados para representar os componentes do sistema, na análise de harmônicas.

Chang e Wu (2005) investigaram o planejamento de filtros harmônicos passivos para um sistema industrial de grande porte, contendo diversas fontes de correntes harmônicas. O planejamento de filtros passivos é realizado com a aplicação do método da evolução diferencial híbrida. A influência das variações das cargas no planejamento é incluída no problema representando-as por meio de

variáveis probabilísticas. O método proposto engloba a aplicação de filtros sintonizados, filtros passa-altas e filtros amortecidos do tipo C.

2.4 Resumo

No atual estágio de desenvolvimento, os métodos propostos para o planejamento ótimo de múltiplos filtros harmônicos em sistemas de distribuição, ainda apresentam algumas limitações. Na Tabela 1 apresenta-se um resumo sucinto do estado da arte na linha de pesquisa ao qual este trabalho se insere - aplicação de métodos heurísticos no planejamento de filtros harmônicos passivos em sistemas de distribuição.

Observa-se que muitos trabalhos não contemplam as variações de carga lineares e não lineares no sistema. Tampouco são apresentados métodos que empreguem diferentes modelos de cargas lineares e componentes do sistema, para proporcionar uma simulação mais realista do sistema sob estudo.

Neste trabalho, apresenta-se um algoritmo que contempla simultaneamente as características enumeradas acima, e que emprega um algoritmo evolutivo para determinação de uma solução otimizada para sistemas radiais de proporções compatíveis com sistemas reais, com a utilização modelos compatíveis com dados normalmente disponíveis na prática. O desenvolvimento desse algoritmo é o tema dos capítulos que se seguem.

Tabela 1. Quadro resumo da revisão bibliográfica.

Referência	Método heurístico	Características	Limitações
Richards e Yang, 1993	Algoritmo Genético	Determina o pior cenário de distorção harmônica para aplicação interativa de filtros passivos	Não realiza o planejamento automático dos filtros passivos
Yang e Richards, 1994	Algoritmo Genético	Extensão do trabalho de Richards e Yang (1993), com a localização automática dos filtros	Utiliza enumeração completa para realizar a localização dos filtros com excessivo custo computacional. Não realiza o projeto ótimo dos parâmetros dos filtros
Chu et al, 1994	Resfriamento Simulado (Simulated Annealing)	Determina as localizações, capacidades e controle de filtros passivos considerando diferentes níveis de carga do sistema de distribuição	Não considera a existência de bancos de capacitores nem a presença de cargas injetoras de harmônicas nas barras do sistema – apenas a onda distorcida de tensão da fonte do sistema.
Chang e Chang, 1998	Evolução Diferencial.	Extensão do trabalho de Chu et al (1994), com a representação de cargas harmônicas nas barras do sistema	Adota uma única frequência de sintonia para todos os filtros passivos e não considera existência de bancos de capacitores para compensação reativa
Berizzi e Bovo, 2000	Algoritmos Genético e Microgenético	Determina simultaneamente a localização e parâmetros de filtros passivos	Codificação permite a obtenção de valores não padronizados de unidades capacitivas. Não considera variações das cargas do sistema
Chang et al, 2004	Algoritmo Genético	Realiza o planejamento de filtros passivos em duas etapas, considerando restrições práticas na obtenção dos parâmetros dos filtros	Não considera as variações de carga do sistema. Só considera a estratégia de planejamento de substituir bancos de capacitores por filtros harmônicos sintonizados
Chang e Wu, 2005	Evolução diferencial híbrida	Considera o planejamento de filtros passivos para sistemas de múltiplas barras e cargas harmônicas. Considera a incerteza do carregamento e parâmetros do sistema	Não considera as variações da curva de carga do sistema. Só considera a estratégia de planejamento de substituir bancos de capacitores por filtros harmônicos sintonizados

Capítulo 3

Planejamento Ótimo de Filtros

Harmônicos Passivos

Em sistemas de distribuição o planejamento objetiva prover um diagnóstico de desempenho e dar o devido embasamento técnico para tomada de decisão quanto às necessárias intervenções no sistema. Para as concessionárias, é necessário prover um adequado e eficiente diagnóstico do desempenho de seu sistema com base no sistema regulatório vigente.

De maneira geral, a avaliação do desempenho de um sistema de distribuição está intimamente relacionada à qualidade da tensão, que envolve, entre outros parâmetros, o desempenho relacionado ao nível de tensão em regime permanente, destacando-se neste trabalho a influência das distorções harmônicas.

Especificamente no tocante às distorções harmônicas de tensão, as concessionárias de distribuição estão começando a investir com mais ênfase nos estudos para avaliação da qualidade da tensão ofertada e nas possíveis soluções para limitar os distúrbios que eventualmente extrapolem os limites regulatórios do sistema elétrico nacional.

A avaliação direta dos distúrbios harmônicos de uma rede pode ser feita por meio de medições, através de um sistema de monitoramento em diversos pontos da rede. Contudo, os custos para monitoramento de todo o sistema de distribuição é muito elevado, pois requer a utilização de uma grande quantidade de equipamentos, além dos custos operacionais para sua implantação, operação e manutenção.

Alternativamente, pode-se desenvolver uma política de monitoramento em pontos estratégicos da rede e utilizar ferramentas de simulação para analisar o desempenho global do sistema. Detectado algum sistema com índices mais críticos, pode-se programar um monitoramento mais efetivo e a busca por soluções para a redução da propagação de correntes harmônicas nos sistemas. Torna-se necessário planejar adequadamente medidas corretivas para minimização dos distúrbios indesejados.

É justamente nesta etapa que este trabalho se insere, propondo uma metodologia para a aplicação de filtros harmônicos passivos no sistema de distribuição com o objetivo de adequar os índices de distorção aos níveis pretendidos.

Nesse sentido, o método de planejamento desenvolvido neste trabalho consiste em determinar os parâmetros ótimos de um determinado número de filtros harmônicos e suas respectivas localizações no sistema de distribuição. O objetivo principal é minimizar as distorções harmônicas de tensão em todas as barras do sistema de distribuição. Outros fatores podem ser levados em conta no planejamento, tais como: compensação reativa, redução de perdas, melhoria no perfil de tensão e observância às restrições práticas no projeto dos filtros.

Para determinar o planejamento ótimo conforme acima formulado, se propõe um método em três estágios. Inicialmente, o sistema de distribuição de energia elétrica em estudo é avaliado, para determinação dos índices de qualidade de energia do sistema e calcular os parâmetros que serão utilizados na função de adaptação dos algoritmos evolutivos. Nessa etapa executa-se um fluxo de carga e

de harmônicas, para cada patamar de carga, considerando apenas a configuração original do sistema de distribuição.

No segundo estágio, emprega-se um algoritmo evolutivo, com codificação das soluções em alfabeto binário, determinando-se as barras mais adequadas à instalação de um número desejado de filtros. Nessa etapa executa-se um fluxo de carga e de harmônicas para todas as configurações propostas no algoritmo evolutivo, levando-se em conta as condições de cada patamar de carga e fatores como compensação reativa e redução de perdas. É a etapa de maior custo computacional.

Na última etapa, se aplica novamente um algoritmo evolutivo para promover a “afinação” dos parâmetros de cada filtro alocado, considerando as restrições práticas impostas no projeto dos mesmos.

Na Figura 1 apresenta-se o fluxograma geral do método proposto. As etapas intermediárias com aplicação dos algoritmos evolutivos, seja para determinação das barras dos filtros, ou para otimização de seus parâmetros, são descritas em profundidade nos capítulos que se seguem.

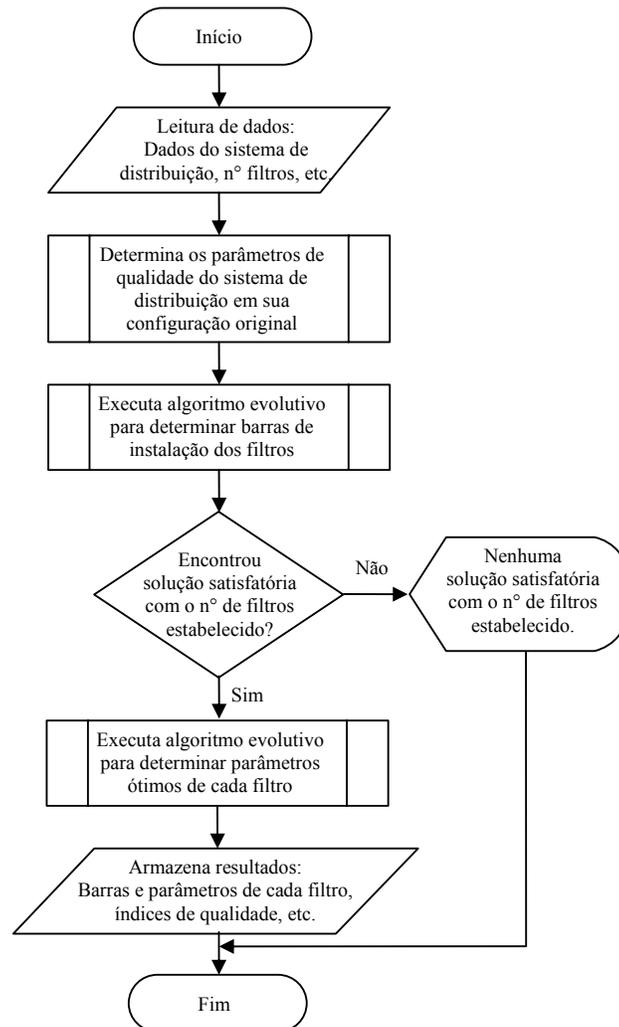


Figura 1. Fluxograma do procedimento geral do método de planejamento proposto.

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos básicos sobre sistemas de distribuição de energia elétrica e a fundamentação teórica na qual se baseia o fluxo de carga e o método de análise de harmônicas utilizado neste trabalho. Também são apresentados os modelos empregados para a representação dos componentes do sistema de distribuição.

3.1 Características e modelagem do sistema de distribuição

O enfoque deste trabalho é nos sistemas de distribuição compostos por alimentadores primários de configuração radial. De fato, no Brasil, o sistema primário de distribuição geralmente é formado por um conjunto de alimentadores radiais originados numa mesma subestação ou em subestações diferentes (Figura 2). O modelo do sistema de distribuição desenvolvido neste trabalho parte dessa premissa de radialidade. Contudo, a metodologia de planejamento desenvolvida é aplicável a alimentadores malhados, desde que seja utilizado um fluxo de potência apropriado para tal tipo de sistema.

Um alimentador radial pode ser visto como uma coleção de barras interligadas por trechos, ou uma coleção de trechos contendo duas barras, sendo o trecho inicial conectado diretamente à subestação. De forma genérica, a barra terminal de cada trecho pode conter cargas lineares, cargas não lineares, bancos de capacitores em derivação e filtros harmônicos passivos. Assim, podemos considerar que os pontos de instalação dos filtros harmônicos formam um conjunto discreto finito, correspondente às barras terminais de todos os trechos do alimentador¹.

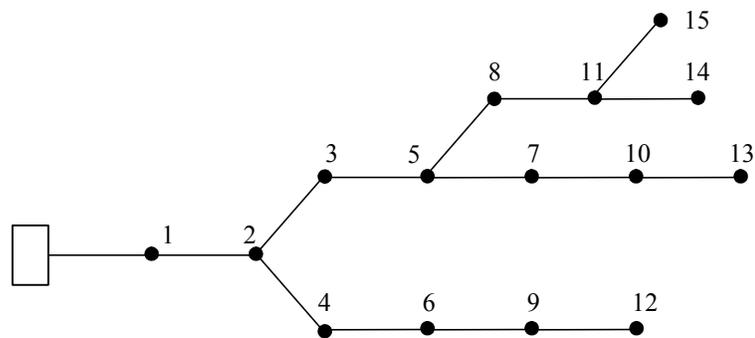


Figura 2. Exemplo de um alimentador radial de 15 barras.

Em relação aos distúrbios harmônicos, estudos mostram que a maioria das distorções encontradas nos sistemas primários de distribuição deve-se

¹ Fica convencionado, a partir deste ponto, que as referências feitas a uma barra genérica i , referem-se à barra terminal do i -ésimo trecho do alimentador.

principalmente as harmônicas de 5^a e 7^a ordens e, em menor grau, as harmônicas de 11^a e 13^a ordens, sendo desprezíveis as harmônicas de ordens acima da 13^a harmônica (EMANUEL et al, 1996; TOSTES et al, 2001). Esta premissa foi adotada neste trabalho, implicando na adoção de modelos com algumas simplificações, conforme discutido na seqüência. Contudo, as metodologias para determinação do fluxo de harmônicas e de potências podem ser aplicadas para sistemas com harmônicas de quaisquer ordens.

3.2 Determinação do fluxo de harmônicas

Várias técnicas podem ser empregadas para analisar o fluxo de harmônicas em sistemas de potência (Task Force on Harmonic Modeling and Simulation, 1996). Estas técnicas variam em termos de requerimentos de dados, complexidade de modelagem, formulação do problema e algoritmos de solução. Qual técnica usar para analisar um problema harmônico em particular é, em grande parte, determinada pelos dados disponíveis. Uma consideração importante é usar um método compatível com a precisão dos dados de entrada. Na prática, medições também são um componente essencial na análise do fluxo de harmônicas, principalmente para a caracterização das cargas injetoras de harmônicas.

Neste trabalho emprega-se o método da injeção de corrente, que é um método de análise no domínio da frequência, comumente usado para determinação do fluxo de harmônicas num alimentador radial de distribuição (ORTMEYER e HIYAMA, 1996; RIBEIRO, 1998). A vantagem deste método é ser compatível com os dados e medições disponíveis na prática, apresentando resultados satisfatórios, embora a sua resposta não seja tão precisa quanto a dos métodos de análise no domínio do tempo. Contudo, para se empregar um método de análise no domínio do tempo, torna-se necessário conhecer e representar em detalhes as características de todos os equipamentos do sistema de distribuição, tais como transformadores, capacitores, linhas de distribuição e cargas lineares e

não lineares, que são bastante numerosos, seja em tipo ou quantidade, e cujos dados são difíceis de obter num caso real.

No método da injeção de corrente, as tensões harmônicas em cada barra são obtidas através da solução das equações de rede, formuladas na forma de matriz de admitâncias e de um conjunto de fontes de correntes que representam as características das cargas não lineares, nas frequências harmônicas de interesse (TASK FORCE ON HARMONIC MODELING AND SIMULATION, 1996; RIBEIRO, 1998). A equação matemática que descreve este método é:

$$\mathbf{Y}^h \mathbf{V}^h = \mathbf{I}^h, \quad (1)$$

onde \mathbf{I}^h é o vetor das correntes harmônicas injetadas nas barras, na frequência harmônica de ordem h , \mathbf{V}^h é o vetor das tensões harmônicas a ser calculado e \mathbf{Y}^h é a matriz admitância da rede. Na notação adotada, o sobrescrito h assume todos os valores de ordens harmônicas de interesse. O sobrescrito 1 ($h = 1$) corresponde aos parâmetros na frequência fundamental.

O conhecimento dos módulos e ângulos das tensões em todas as barras do sistema é fundamental para a correta modificação da matriz admitância do sistema a cada ordem harmônica de interesse (TASK FORCE ON HARMONIC MODELING AND SIMULATION, 1996). Dessa forma, cada vez que o sistema de distribuição for modificado com a inclusão de filtros harmônicos em pontos distintos do alimentador, torna-se necessário executar um novo fluxo de carga para se determinar o módulo e ângulo da tensão em cada barra, à frequência fundamental da rede (RIBEIRO, 1998).

A principal desvantagem deste método é o uso de espectro harmônico típico para representar os dispositivos produtores de harmônicos. Isto prevê uma adequada avaliação de casos envolvendo condições de operação atípicas. Tais condições incluem, por exemplo, carregamento parcial dos dispositivos produtores de harmônicas e condições de redes desbalanceadas.

3.3 Determinação do fluxo de carga

O cálculo de fluxo de carga é resolvido neste estudo pelo método iterativo da soma de potências (DAS et al, 1995), por ser um método que tem apresentado bons resultados para redes de distribuição radiais em termos de convergência, precisão dos resultados, tempo total de computação e facilidade de modelagem dos componentes do sistema de distribuição (SOUZA et al, 2002).

Considere o trecho de alimentador i mostrado na Figura 3. O problema consiste em determinar a amplitude da tensão na barra terminal, V_i^1 , sendo conhecidos os valores da impedância do trecho, $R_i + jX_i$, o fluxo de potência no fim do trecho, $p_i + jq_i$, e a amplitude da tensão na barra inicial, $V_{\Omega_i}^1$.

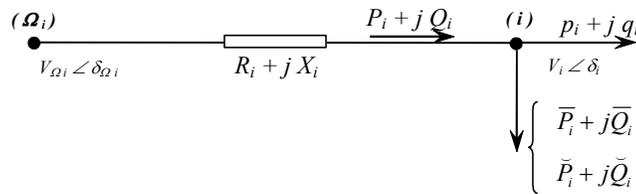


Figura 3. Detalhamento de um trecho genérico, i , de um alimentador radial.

Considere os parâmetros A , B e C expressos do seguinte modo:

$$A = R_i P_i + X_i Q_i - \frac{1}{2} V_{\Omega_i}^1{}^2, \quad (2)$$

$$C = (R_i^2 + X_i^2)(P_i^2 + Q_i^2), \quad (3)$$

e

$$B = \sqrt{A^2 - C}. \quad (4)$$

A amplitude da tensão na barra terminal é dada por:

$$V_i^1 = \sqrt{B - A}, \quad (5)$$

e as perdas no trecho,

$$\Delta P_i = R_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^1{}^2}, \quad (6)$$

e

$$\Delta Q_i = X_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^1{}^2}. \quad (7)$$

Na determinação das tensões em todos os trechos do alimentador radial, o seguinte procedimento iterativo é adotado:

1. Inicialmente todas as perdas de potência são consideradas nulas;
2. O fluxo de potência $P_i + jQ_i$ em todos os trechos é calculado no sentido das barras terminais para a barra da subestação;
3. As tensões de barra e as perdas de potência são calculadas, no sentido da barra da subestação até as barras terminais;
4. Os passos 2 e 3 são repetidos enquanto as variações dos valores das perdas totais do alimentador forem maiores que uma tolerância pré-especificada.

Depois de concluído este processo iterativo, os ângulos das tensões são obtidos recursivamente, no sentido da barra da subestação, cujo ângulo é conhecido a priori, até as barras terminais do alimentador.

3.4 Modelos dos componentes do sistema

Na formulação da matriz admitância da rede, cada componente do sistema de distribuição deve ser representado por um modelo equivalente que leve em consideração a alteração de seus parâmetros devido à variação da frequência (RIBEIRO, 1992).

Foram empregados conceitos de programação orientada a objetos, de forma que novos modelos de componentes podem ser agregados ao algoritmo com facilidade.

3.4.1 Linhas aéreas de distribuição

A modelagem de linhas de transmissão e transformadores sobre uma larga faixa de frequências é bem documentada na literatura (Arrillaga et al, 1992). Em geral, as linhas aéreas podem ser modeladas por um circuito π equivalente com acoplamento polifásico. Para a análise de harmônicas em circuitos balanceados, o

modelo pode ser simplificado por um circuito π simples, determinado pelos dados de impedância de seqüência positiva da linha.

Os principais problemas na modelagem de linhas aéreas são:

- A dependência com a freqüência da impedância série por unidade, cujas maiores causas são os efeitos de retorno pela terra e o efeito pelicular (efeito *skin*) do condutor.
- A natureza de parâmetros distribuídos (efeito de linha longa) da impedância série por unidade e da capacitância shunt.

As linhas de distribuição podem ser representadas, com precisão adequada, por um modelo π equivalente, composto por uma impedância série e uma admitância shunt, cujos parâmetros são dependentes da freqüência. Para as ordens harmônicas típicas encontradas em sistemas de distribuição pode-se considerar que a capacitância das linhas é desprezível (EMANUEL et al, 1996; TOSTES et al, 2001).

Dessa forma, neste trabalho é usada uma representação simples para cada trecho do alimentador de distribuição, por meio de uma impedância série. Assim, as admitâncias de cada trecho do alimentador, em cada freqüência harmônica, são expressas por:

$$y_{Li}^h = \frac{1}{R_{Li} + jhX_{Li}} \quad , \quad (8)$$

sendo R_{Li} e X_{Li} a resistência e a reatância indutiva do i -ésimo trecho de linha do alimentador.

O efeito pelicular também pode ser incorporado, adotando-se a devida correção no valor da resistência de cada trecho, aplicando-se uma correção para a resistência do trecho, aplicando a equação (RIBEIRO, 1992):

$$R_{Li} = R_{Li} \left[1 + \frac{0,646h^2}{192 + 0,518h^2} \right] \quad . \quad (9)$$

3.4.2 Transformadores

Como os efeitos dependentes da frequência não são significantes nas frequências harmônicas mais comuns nos sistemas de distribuição, os transformadores são representados neste trabalho por uma combinação série de resistência e reatância indutiva (NEVES et al, 1995; ARRILLAGA et al, 1996). A determinação de sua admitância harmônica é dada pela expressão:

$$y_{T_i}^h = \frac{1}{R_{T_i} + j h X_{T_i}} \quad (10)$$

onde R_{T_i} é obtida das perdas ativas de potência do transformador instalado no trecho i , X_{T_i} é a reatância de curto-circuito do transformador. Um fator de multiplicação dependente da frequência pode ser adicionado ao termo de reatância para levar em conta o efeito pelicular.

Os transformadores podem provocar um deslocamento de fase de ± 30 graus nas tensões e correntes harmônicas, dependendo da ordem harmônica, da seqüência e das conexões do transformador. A modelagem dos efeitos de deslocamento de fase é essencial se há mais de uma fonte harmônica no sistema. Dessa forma, na representação monofásica adotada neste trabalho, usa-se um modelo de “fase deslocada” para representar os efeitos descritos acima.

3.4.3 Bancos de capacitores

Na frequência nominal da rede, os bancos de capacitores empregados para correção de fator de potência são representados por sua reatância capacitiva. Assim, a determinação da admitância harmônica de um eventual banco de capacitores instalado na barra terminal do trecho i , em cada frequência harmônica, é dada pela expressão:

$$y_{C_i}^h = h y_{C_i}^1, \quad (11)$$

em que, $y_{C_i}^1$ é a admitância shunt do banco de capacitores à frequência fundamental, instalado na barra terminal do trecho i .

3.4.4 Cargas lineares

Nos estudos de fluxo de harmônicas em sistema de distribuição é comum modelar-se uma carga agregada para representar todas as cargas atendidas radialmente a partir de cada barra do alimentador de distribuição. É muito difícil estabelecer um modelo único, baseando-se apenas em análises teóricas, devido a diversidade de cargas existente nos sistemas de distribuição. Ribeiro (1992) apresenta um estudo detalhado sobre a utilização de modelos equivalentes para a representação de sistemas de distribuição e cargas em estudos harmônicos.

Geralmente, dispõe-se apenas dos dados de potência ativa e reativa absorvida em cada barra, ou, pelo menos uma boa estimativa da mesma. Estes dados de carga são utilizados para computar os parâmetros da carga agregada em cada barra, que usualmente são representadas através de uma combinação série ou paralela de resistência e reatância indutiva.

Neste estudo vários modelos de carga (Figura 4) foram incorporados às rotinas de cálculo. A escolha do modelo de carga a ser utilizado depende do conhecimento da composição das cargas atendidas em cada barra (Ribeiro, 1992; Task Force on Harmonic Modeling and Simulation, 2003). A influência de cada tipo de carga no estudo realizado neste trabalho apresentada no capítulo 6. Detalhes sobre a escolha do melhor modelo são discutidas por Task Force on Harmonic Modeling and Simulation, (2003).

A admitância harmônica da carga linear numa barra i do sistema, $y_{LL_i}^h$, é calculada a partir dos parâmetros do modelo de carga empregado, obtidos conforme indicado na Figura 4. Considerando, por exemplo, a representação RL paralela (Modelo B), que é muito empregada nos estudos apresentados na literatura, a admitância harmônica das cargas lineares é dada pela expressão:

$$y_{LL_i}^h = \frac{1}{R} + \frac{1}{jhX_L}. \quad (12)$$

ou ainda,

$$y_{LL_i}^h = \frac{\bar{P}_i}{V_i^{12}} - j \frac{\bar{Q}_i}{V_i^{12}}. \quad (13)$$

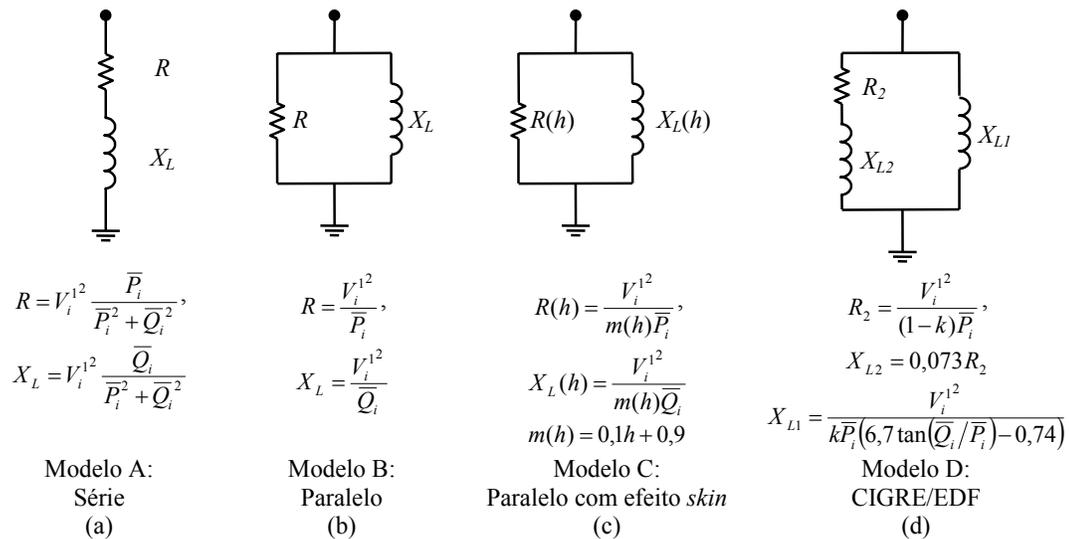


Figura 4. Modelos empregados na representação de cargas lineares.

3.4.4.1 Variações das cargas lineares

Além da diversidade, as cargas existentes nos sistemas de distribuição apresentam constante variação ao longo do dia. Isto faz com que as impedâncias e condições de ressonância do sistema variem constantemente, aumentando a dificuldade do planejamento de filtros harmônicos. Para considerar essas variações no planejamento dos filtros harmônicos, utilizam-se neste estudo as informações das curvas de carga do sistema de distribuição.

A curva de carga levantada em uma subestação fornece dados relevantes para aplicações de fluxo de carga e estimação do nível das perdas do sistema. Uma vez levantada uma curva de carga na subestação, duas outras, a partir desta, podem ser construídas para fins de análise: a curva de duração de carga correspondente e a curva de duração de carga segmentada, conforme ilustrado na Figura 5. A curva de duração de carga é formada pelos pontos (p, t) tais que t é a integral de todos os tempos infinitesimais durante os quais a potência é maior ou igual a p . A conveniência de se usar a curva de duração de carga deve-se ao fato desta ser monótona e decrescente.

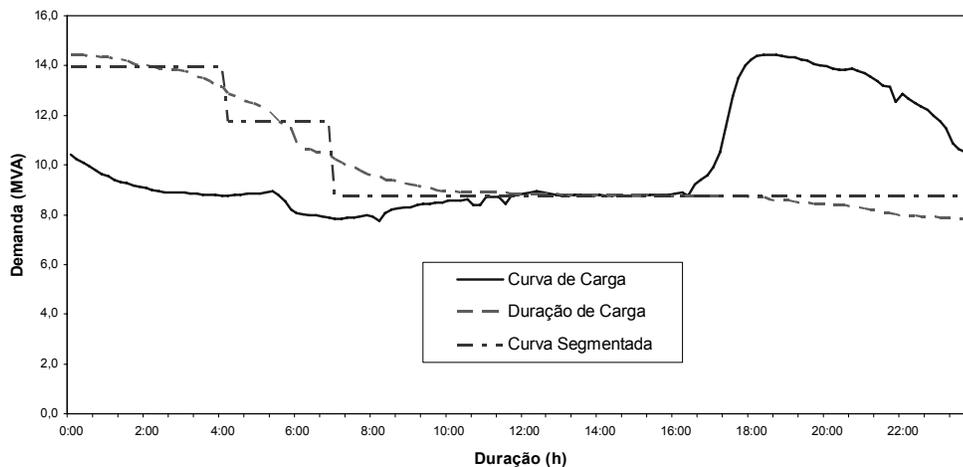


Figura 5. Curvas de carga, duração de carga e curva segmentada correspondente.

A curva de duração de carga é segmentada aplicando um processo que consiste em aproximá-la por um determinado número de níveis discretos. A aproximação em níveis discretos pode ser feita por simples observação da curva de duração de carga ou se pode empregar uma técnica de otimização para minimizar o erro da aproximação (SOUZA et al, 2002). Usualmente, a curva é aproximada por dois degraus, correspondentes aos horários de pico e fora de pico. Melhor aproximação se consegue tomando-se mais degraus, embora isso implique maior esforço computacional. O número de degraus ou de níveis é escolhido de acordo com a precisão dos resultados e a velocidade de processamento desejada (SOUZA et al, 2003).

A cada patamar de carga corresponde um fator de carga, que é utilizado para corrigir o valor das cargas lineares em cada barra, i :

$$\bar{P}_{i_{np}} = \bar{P}_i \times fc_{np}, \quad (14a)$$

$$\bar{Q}_{i_{np}} = \bar{Q}_i \times fc_{np}. \quad (14b)$$

3.4.5 Cargas não lineares

Neste trabalho, as cargas não lineares são representadas por fontes de correntes harmônicas equivalentes, empregando-se o método apresentado por Task Force on Harmonic Modeling and Simulation (2003). Em cada barra do

alimentador de distribuição considera-se uma única carga não linear agregada, que representa todas as cargas não lineares atendidas radialmente a partir da barra referenciada. Para estabelecer a situação mais crítica, utiliza-se a maior injeção de harmônicas em cada patamar de carga considerado.

O valor nominal de cada fonte de corrente harmônica, à frequência da rede é dada por:

$$I_i^1 = \left(\frac{\check{P}_i + j\check{Q}_i}{V_i^1} \right)^*, \quad (15)$$

sendo \check{P}_i e \check{Q}_i as potências ativa e reativa da carga não linear na barra i .

Nas ordens harmônicas de interesse, cada fonte de corrente assume um valor distinto, de acordo com seu espectro harmônico:

$$I_i^h = C_i(h)I_i^1, \quad (16)$$

sendo $C_i(h)$ o percentual da corrente harmônica na i -ésima barra, na ordem harmônica h . Este parâmetro estabelece o espectro da corrente harmônica injetada pela carga não linear na barra i . Na frequência fundamental, $C_i(1)=1,0$ (100%). Para diferentes patamares de carga, podem ser estabelecidos diferentes espectros.

Os ângulos de fase das fontes de corrente são ajustados de acordo com os ângulos do espectro da carga não linear em cada ordem harmônica. Para tanto, aplica-se a equação:

$$\theta_i^h = \theta_{esp_i}^k + h(\theta_i^1 - \theta_{esp_i}^1), \quad (17)$$

sendo $\theta_{esp_i}^k$ e $\theta_{esp_i}^1$ são os ângulos do espectro da corrente harmônica referente à carga não linear da i -ésima barra, na frequência fundamental e na ordem harmônica h , respectivamente. θ_i^1 é o ângulo de fase da corrente na i -ésima barra, na frequência fundamental – conhecido nos resultados do fluxo de carga.

A utilização de dados de medição é essencial para caracterizar o espectro característico das cargas não lineares, ou seja, estabelecer os módulos (percentuais) e ângulos de fase das correntes harmônicas em cada ordem harmônica de interesse.

3.4.5.1 Variações das cargas não lineares

Duas abordagens foram consideradas neste estudo para representar as variações das cargas não lineares no planejamento dos filtros harmônicos. A primeira abordagem foi supor a mesma variação aplicada às cargas lineares - utilizando as informações das curvas de carga do sistema de distribuição, e mantendo o mesmo espectro típico em todos os patamares de carga.

A outra abordagem foi supor uma variação particular para cada carga não linear, utilizando uma curva de carga própria, com espectros harmônicos distintos em cada patamar da curva de carga.

A primeira abordagem é mais fácil de implementar e mais prática, pois utiliza dados normalmente disponíveis. A segunda proporciona resultados mais precisos na simulação do fluxo de harmônicos no sistema, mas requer dados de medição (ou estimados) em todas as barras que possuam cargas não-lineares.

3.5 Filtros harmônicos passivos

Os filtros harmônicos passivos são compostos por elementos passivos: resistores, indutores e capacitores. Os tipos mais comuns de filtros harmônicos passivos aplicados em sistemas industriais e de distribuição são os filtros sintonizados, os filtros amortecidos de segunda e terceira ordem e os filtros amortecidos do tipo C.

Os circuitos típicos destes tipos de filtros são ilustrados na Figura 6. O filtro sintonizado é o tipo mais comumente utilizado, principalmente porque apresenta menores custos e perdas do que os filtros amortecidos com mesma capacidade e é mais simples de projetar.

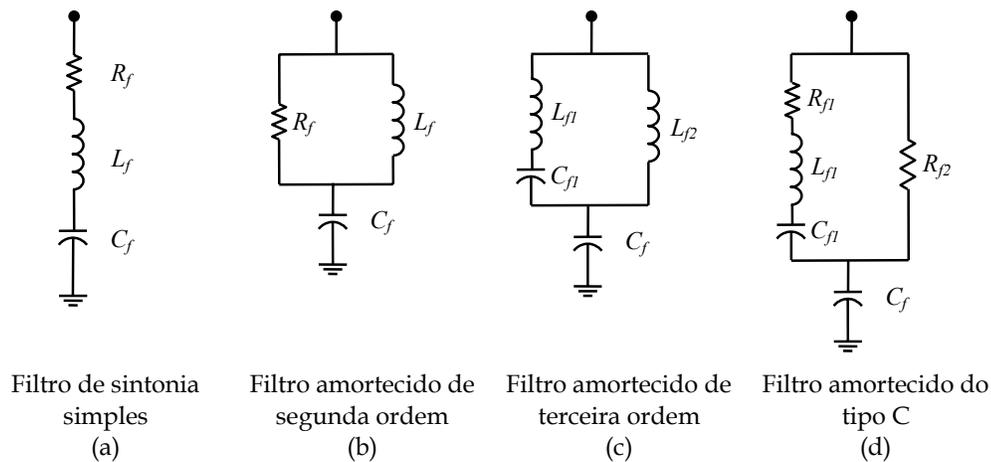


Figura 6. Filtros harmônicos passivos típicos.

Embora a metodologia desenvolvida neste trabalho possa ser estendida para o projeto dos demais tipos de filtros, considera-se aqui apenas a aplicação de filtros passivos sintonizados, com a premissa de que os componentes de importância dos distúrbios harmônicos encontrados nos sistemas de distribuição, raramente ultrapassam a 13ª ordem (ORTMEYER e HIYAMA, 1996; TOSTES et al, 2003). Nessa condição, geralmente é suficiente utilizar um filtro sintonizado para cada ordem harmônica de interesse em barras distintas do alimentador, ou um filtro composto por ramos de filtros sintonizados de diversas ordens, instalado em uma única barra do sistema (ORTMEYER e HIYAMA, 1996).

Para tratar o projeto ótimo de cada filtro como um problema de otimização combinatória, considera-se que os filtros passivos são compostos por módulos capacitivos que são múltiplos inteiros de valores padronizados comercialmente disponíveis (50 ou 100 kvar, por exemplo), formando um conjunto discreto finito.

3.5.1 Parâmetros dos filtros sintonizados

A impedância de um filtro sintonizado numa frequência de ordem harmônica qualquer, é definida como

$$Z_f^h = R_f + j(X_{L_f}^h - X_{C_f}^h) , \quad (18)$$

em que $X_{L_f}^h$ e $X_{C_f}^h$ são, respectivamente, as reatâncias indutiva e capacitiva do filtro, na frequência harmônica de ordem h . Logo, a admitância do filtro harmônico sintonizado, instalado na i -ésima barra, numa ordem harmônica h é:

$$y_{\bar{F}_i}^h = \frac{1}{R_{f,i} + j(X_{L_f,i}^h - X_{C_f,i}^h)}. \quad (19)$$

Frequência de sintonia

A frequência de sintonia correspondente à frequência para qual a reatância indutiva iguala a reatância capacitiva, sendo definida por

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}}, \quad (20)$$

donde

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}}, \quad (21)$$

e

$$h_s = \frac{1}{\omega_1 \sqrt{L_f C_f}}, \quad (22)$$

em que f_s é a frequência de ressonância do filtro (em Hz), ω_s é a frequência angular de ressonância do filtro (em rad/s), e h_s é a ordem harmônica de ressonância do filtro. L_f e C_f são os valores nominais da indutância e capacitância do filtro.

Na frequência de sintonia, a impedância do filtro é

$$Z_f^{hs} = R_f. \quad (23)$$

e a reatância capacitiva ou indutiva do filtro na frequência de sintonia:

$$X_{f0}^{hs} = X_{L_f}^{hs} = X_{C_f}^{hs}, \quad (24)$$

em que

$$X_{L_f}^{hs} = \omega_s L_f \quad (25)$$

$$X_{C_f}^{hs} = \frac{1}{\omega_s C_f}. \quad (26)$$

Fator de qualidade

O fator de qualidade do filtro é definido por

$$f_Q = \frac{X_{f0}}{R_f} \quad (27)$$

É comum adotar um fator de qualidade elevado, para reduzir as perdas no filtro. Para filtros instalados em sistemas de distribuição, é comum empregar-se um fator de qualidade entre 50 e 100 (CZARNECKI e GINN, 2004).

3.5.2 Cálculo dos componentes do filtro

Como a estratégia adotada neste trabalho consiste em determinar o número de módulos capacitivos a serem utilizados na composição dos filtros, inicialmente é definida a capacidade reativa da unidade capacitiva do filtro. Neste trabalho, considerada um múltiplo de uma unidade comercialmente disponível.

Em seguida, calculam-se os valores de reatância capacitiva e capacitância correspondente, na frequência da rede:

$$X_{Cf}^1 = \frac{V_i^2}{k_j Q_C}, \quad (28)$$

em que, k_j é o número de módulos capacitivos que compõe o filtro, e Q_C a capacidade nominal dos módulos capacitivos disponíveis para instalação.

$$C_f = \frac{1}{\omega_1 X_{Cf}^1}. \quad (29)$$

Da equação (22), temos

$$X_{Lf}^1 = \frac{X_{Cf}^1}{h_s^2}, \quad (30)$$

logo,

$$L_f = \frac{X_{Lf}^1}{\omega_1}, \quad (31)$$

Definido o fator de qualidade, calcula-se o valor da resistência, aplicando-se a equação (24):

$$R_f = \frac{X_{f0}}{f_Q}.$$

A potência reativa efetivamente fornecida pelo j -ésimo filtro harmônico na frequência da rede é expressa por (CHANG e CHANG, 1998):

$$Q_{F_j}^1 = \frac{h_{r_j}^2}{(h_{r_j}^2 - 1)} k_j Q_C. \quad (32)$$

3.5.3 Restrições gerais no projeto de filtros

Variações na frequência de sintonia do filtro

A frequência de sintonia do filtro é função da indutância e capacitância do filtro, conforme estabelece a eq (20). Quaisquer variações nesses parâmetros podem modificar o valor originalmente projetado do ponto de ressonância do filtro (“dessintonizar o filtro”). De fato, podem ocorrer variações nos valores nominais da capacitância e indutância dos componentes do filtro. Estas variações devem-se, quase exclusivamente, a dois fatores: variações de temperatura e tolerâncias de fabricação desses elementos. Também podem ocorrer variações na frequência fundamental, que podem ser desprezadas em redes fortemente interligadas.

Não há consenso na literatura sobre os valores de variações a considerar. Lin et al (1998), por exemplo, consideram variações na capacitância entre -7% a +12% e na indutância de $\pm 3\%$, enquanto Chang et al (2004) consideram variações entre -4% a +6% para a capacitância e $\pm 3\%$ para a indutância.

Os valores mais extremos de variações possíveis para o ponto de ressonância do filtro podem ser obtidos substituindo os percentuais mais extremos de variações de capacitância e indutância na eq. (22):

$$h \times \frac{1}{\sqrt{1,03 \times 1,12}} \leq h_s \leq h \times \frac{1}{\sqrt{0,97 \times 0,93}},$$

$$0,93h \leq h_s \leq 1,05h. \quad (33)$$

Por exemplo, para um filtro sintonizado exatamente na 5ª harmônica ($h = 5$) a faixa de variação da frequência de sintonia é $4,65h \leq h_s \leq 5,25$. Para um filtro sintonizado em $h = 4,6$, a faixa de variação seria $4,28h \leq h_s \leq 4,83$.

Restrições práticas

O projeto de filtros harmônicos não se limita ao cálculo dos elementos do filtro, tendo em conta apenas questões ligadas com a necessidade de atenuação de um harmônico ou a minimização global da distorção harmônica num dado barramento. Também é necessário atender algumas restrições de ordem prática, como:

- Tensão aplicada sobre os capacitores;
- Potência dissipada nos componentes resistivos do filtro.

A tensão, na frequência fundamental, aplicada sobre o componente capacitivo de um filtro, instalado na barra i , é calculada por:

$$V_{cf}^1 = -jX_{cf}^1 I_f^1 = \frac{-jX_{cf}^1}{-jX_{cf}^1 + jX_{lf}^1 + R_f} V_{Fi}^1. \quad (34)$$

Considerando a presença de harmônicas, a tensão efetivamente aplicada sobre a capacitância pode ser calculada através da soma aritmética da componente fundamental da queda de tensão em X_{cf}^1 , com a queda de tensão para todas as harmônicas em questão:

$$V_{cf}^h = \sum_{h=1}^H I_f^h X_{cf}^h, \quad (35)$$

sendo I_f^h o valor da corrente veiculada através do filtro para o harmônico h e X_{cf}^h o valor da reatância capacitiva do filtro, para a mesma ordem harmônica.

A potência dissipada nos componentes resistivos do filtro, P_F , é calculada contabilizando a componente fundamental e harmônicas, pela expressão

$$P_F = \frac{R_f Q_{Fi}^1{}^2}{V_i^1{}^2} + \frac{V_i^h{}^2}{R_f}. \quad (36)$$

3.6 Índices de Distorção Harmônica

Os índices de distorção considerados para a análise de harmônicas neste trabalho são *Distorção Harmônica Individual de Tensão* e *Distorção Harmônica Total de Tensão* nas barras do sistema.

A *Distorção Harmônica Individual de Tensão (DHI_v)* expressa a amplitude porcentual da tensão harmônica, em cada barra *i*, em relação à tensão na frequência fundamental:

$$DHIv_i = \frac{V_i^h}{V_i^1} \times 100\% \quad (37)$$

A *Distorção Harmônica Total de Tensão (DHT_v)* representa o grau de distorção harmônica total, de cada barra *i*, em relação à componente fundamental (IEEE STANDARD 519, 1992) e é definida como:

$$DHTv_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_i^{h^2}}}{V_i^1} \times 100\% \quad (38)$$

Para computar estes índices de distorção, utiliza-se a tensão nominal nas barras, V_i^1 , cujos valores de tensão são obtidos da solução do fluxo de carga.

3.7 Limites de Distorção Harmônica

Na literatura, a maioria dos estudos utilizam os limites para a distorção harmônica individual e total propostos pelo IEEE Standard 519 (1992), reproduzidos na Tabela 2.

Tabela 2. Limites de distorção harmônica de tensão propostos pelo IEEE Standard 519.

Nível de tensão do sistema	Distorção Harmônica Individual (DHI _v)	Distorção Harmônica Total (DHT _v)
120 V até 69kV	3,0%	5,0%
Acima de 69kV até 161kV	1,5%	2,5%
Acima de 161kV	1,0%	1,5%

No Brasil, os índices de qualidade da energia que devem ser respeitados no fornecimento de energia elétrica por cada concessionária de distribuição, são regulamentados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Embora os índices ainda não estejam estabelecidos definitivamente, a versão preliminar dos Procedimentos de Distribuição (2005), no submódulo 3.1 - Critérios Técnicos - sugere os limites para distorções harmônicas de tensões nas redes de distribuição, apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Limites de distorção harmônica de tensão estabelecidos pela ANEEL.

V ≥ 13,8 kV			
Ímpares		Pares	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
Todos	≤ 4%	Todos	≤ 2%
DHTT ≤ 5%			

Em sistemas de transmissão, aplicam-se os indicadores de avaliação do desempenho global da rede básica quanto a harmônicos, estabelecidos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Os limites de distorção harmônica de tensão, dependendo do nível de tensão do sistema, são estabelecidos no submódulo 2.2 - Padrões de desempenho da Rede Básica (ONS, 2005), conforme se apresentam na Tabela 4.

Tabela 4. Limites de distorção harmônica de tensão estabelecidos pelo ONS.

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%	-	-
DHTT = 6%				DHTT = 3%			

Neste trabalho foram adotados os índices propostos pelo IEEE Standard 519 (1992), tendo em vista realizar comparações com os trabalhos encontrados na literatura.

Capítulo 4

Introdução aos Algoritmos Evolutivos

4.1 Introdução

A escolha do método de otimização mais adequado para cada problema depende fortemente do seu tipo. Para problemas lineares com restrições lineares, programação linear parece o mais adequado. Se o problema puder ser decomposto em diferentes estágios, o mais adequado seria programação dinâmica. Para problemas não-lineares com restrições lineares ou não-lineares, o melhor seria a escolha de um método de otimização não-linear. Na área da Pesquisa Operacional, outros métodos também surgiram recentemente, tais como Busca Tabu e *Simulated Annealing*. Por que escolher Algoritmos Evolutivos?

Os Algoritmos Evolutivos são métodos de otimização global de busca adaptativa, inspirados nos mecanismos da evolução biológica, que seguem o princípio da seleção natural e sobrevivência dos indivíduos mais aptos ao ambiente.

Os algoritmos evolutivos têm sido amplamente utilizados por suas características de versatilidade, robustez, simplicidade e eficiência, ainda que para determinados tipos de problemas sejam menos eficientes que métodos específicos.

A versatilidade dos algoritmos evolutivos consiste no fato de serem capazes de lidar com diferentes tipos de problemas sem grandes mudanças no programa principal, pois fazem uso de uma descrição genérica do que se deseja em uma boa solução através da função de adequação (*fitness*). Assim, os algoritmos evolutivos não fazem exigência de derivadas, continuidade ou qualquer informação adicional da função. Como não necessita de informações adicionais da função, pode facilmente ser usado para diferentes funções.

Ainda que apresentem uma taxa de convergência apenas boa, pois não se pode garantir a obtenção do máximo, os algoritmos evolutivos são normalmente robustos o bastante para convergirem para a região de máximo. Isto porque utilizam regras de transição probabilísticas e fazem busca sobre uma população de soluções e não sobre uma única solução.

A relativa simplicidade, comparada com os demais métodos de otimização, também foi uma das grandes responsáveis pela escolha de algoritmos evolutivos em diferentes áreas. Tanto a simplicidade de entendimento do processo quanto de programação devem ser destacadas.

Quanto a sua eficiência, os algoritmos evolutivos destacam-se por apresentar bons resultados nas mais diversas áreas. Problemas de complexidade média podem ser resolvidos com algoritmos evolutivos simples, usando apenas os operadores básicos.

Na categoria dos algoritmos evolutivos, os mais empregados e conhecidos são os Algoritmos Genéticos (AG), criados por John Holland nos anos 60 e desenvolvidos por seu grupo de pesquisa até meados dos anos 70 (HOLLAND, 1975). Um dos alunos de Holland, David Goldberg, passou a ser um dos grandes responsáveis pela popularização dos AG com a publicação do livro "*Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning*" (GOLDBERG, 1989), que até hoje ainda é uma das principais referências sobre Algoritmos Genéticos.

Nos AG, cada solução potencial é codificada e representada por um indivíduo e seu respectivo cromossomo. Cada cromossomo, por sua vez, é formado por um conjunto de genes. O conjunto de indivíduos é dito ser uma população. Para um dado número de iterações, chamadas gerações, os indivíduos competem entre si pela sobrevivência através de um esquema de evolução, que favorece os indivíduos mais adaptados ao ambiente e seleciona os que sofrerão transformações, dando origem à uma nova população. Ao término do processo, o melhor indivíduo usualmente representa a solução ótima global, ou ao menos uma boa aproximação dela.

Na última década, a popularização dos AG em diversas áreas do conhecimento mostrou-se cada vez maior. Na área da engenharia elétrica, os AG ganham cada vez mais espaço. Desde o começo da década de 90, por exemplo, eles são utilizados com bastante sucesso na solução de problemas de otimização, como, por exemplo, no planejamento ótimo da alocação de bancos de capacitores (CHUNG e LEUNG, 1999; SOUZA et al, 2002). A principal desvantagem dos AG é o elevado tempo de processamento, devido à sua concepção evolutiva. Para atenuar esse problema têm-se utilizado algoritmos microgenéticos, cujo tempo de processamento é consideravelmente menor (KRISNAKUMAR, 1989; SOUZA et al., 2004).

4.2 Terminologia

Como os algoritmos evolutivos utilizam uma terminologia importada da Biologia, especialmente da área de evolução, é importante se definir alguns termos, a serem utilizados daqui por diante.

Genes: São os parâmetros codificados do problema a serem otimizados e representam um ponto no espaço de busca. Formam o bloco básico de otimização.

Cromossomo: É a estrutura de dados que codifica uma solução possível do problema. É formado por um conjunto de genes.

Indivíduo: É um simples membro da população. Um indivíduo é formado pelo cromossomo e sua aptidão.

Função de adaptação (função *fitness*): É a função objetivo que define o foco da otimização. A aptidão de cada indivíduo na população corresponde ao valor de sua função de adaptação, que será a responsável pela ligação entre o problema físico e o algoritmo evolutivo.

População Inicial: Um conjunto finito de indivíduos. A partir desta população os algoritmos evolutivos tentarão evoluir para uma melhor solução do problema.

Gerações: Populações consecutivas de cromossomos. A partir da população inicial, sucessivas gerações de cromossomos serão geradas, analisadas, cruzadas e propagadas ou descartadas.

Pais: São pares de cromossomos escolhidos aleatoriamente na população. Suas características serão combinadas gerando *filhos*.

Filhos: São cromossomos gerados a partir dos pais, através do processo de reprodução.

4.3 O Algoritmo Genético Simples

As principais etapas de um AG Simples são: codificação, inicialização, avaliação da população, reprodução – que compreende seleção, cruzamento e mutação, e a renovação da população.

O mecanismo básico de funcionamento de um AG simples é apresentado esquematicamente na Figura 7. Para cada uma das etapas do algoritmo, representadas pelos blocos na Figura 7, existem várias possibilidades de implementação discutidas na literatura. Cada novo problema requer o teste de diversas possibilidades e, se necessário, o desenvolvimento de novos operadores, específicos para as características do problema.

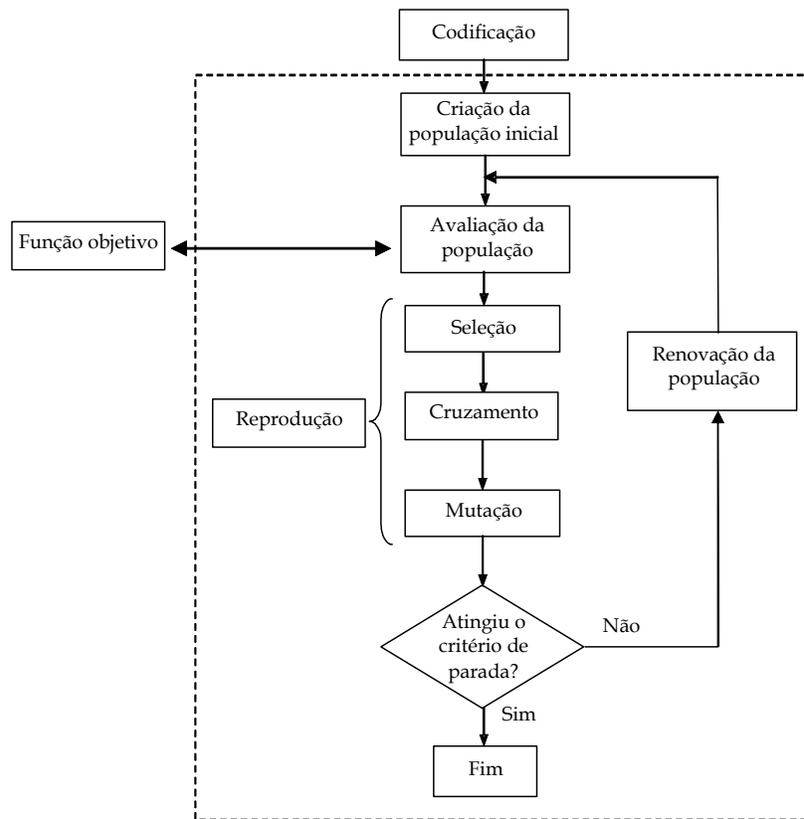


Figura 7. Fluxograma de um Algoritmo Genético Simples.

4.3.1 Codificação

A codificação é uma etapa preliminar e essencial à resolução do problema por AG. Esta define a representação genética das soluções nos cromossomos, ou seja, representam o conjunto de parâmetros da função objetivo cuja resposta será maximizada ou minimizada. A codificação escolhida influencia o desempenho de todas as etapas do algoritmo. O ideal é a utilização de representações compactas, completas e estáveis.

Uma representação compacta deve se valer do menor número possível de variáveis para representar de forma unívoca uma solução. Representações completas devem ser capazes de representar todas as possíveis soluções do problema – inclusive a ótima, ou pelo menos toda a região de interesse. Uma representação estável tem como característica que pequenas mudanças no cromossomo levam a alterações também pequenas da adaptabilidade.

Obviamente, mais de um tipo de representação é possível, com números inteiros, reais ou binários. Contudo, a representação mais utilizada é a codificação binária. Esta codificação facilita as operações genéticas e provê maior diversidade em cada geração. Outras codificações também são possíveis, como código *Gray* e espaçamento não-uniforme (ALVES, 2003).

O AG simples utiliza codificação binária. Nela, o cromossomo é representado como uma cadeia de bits. Múltiplas variáveis ou parâmetros do problema podem ser representados num mesmo cromossomo, cada uma ocupando uma parte da cadeia de bits.

4.3.2 Inicialização

Corresponde à criação da população inicial. Usualmente, esta é feita preenchendo-se de forma aleatória todos os cromossomos da população inicial. Para codificação binária foi observado que, para se manter uma diversidade populacional razoável, se deveria trabalhar com uma população inicial de dimensões, no mínimo, da mesma ordem de grandeza que o número de bits do cromossomo (GOLDBERG, 1989).

4.3.3 Avaliação da população

Na avaliação da população, a determinação de uma função de adaptação (função de aptidão ou função *fitness*) adequada para o problema é um dos passos mais importantes do algoritmo. De fato, é unicamente através da função de adaptação que o AG recebe informações sobre o problema a otimizar. Caso esta função seja inapropriada, a otimização fica impossibilitada de encontrar as melhores soluções, por melhor que estejam configurados os parâmetros e operadores do algoritmo.

Deve-se buscar a melhor forma de transformar a função objetivo do problema em uma função matemática a ser maximizada, que efetivamente representará a função de adaptação. Por exemplo, se desejamos minimizar uma determinada função objetivo $f(x)$, deve-se então utilizar a função de adaptação

$g(x) = -f(x)$. É interessante que a função de adaptação produza sempre valores positivos para facilitar o processo de seleção (GALVÃO e VALENÇA, 1999).

Uma característica importante da função de adaptação é que ela deve ser calculada de uma forma eficiente. Isto porque a função de adaptação deve ser avaliada para cada indivíduo em cada nova geração. Em uma simulação com g gerações e p indivíduos na população, a função de adaptação terá sido calculada gp vezes durante o processo. Assim, a eficiência do algoritmo depende muitas vezes da eficiência com a qual se calcula a função de adaptação. Além do que, a função objetivo em alguns problemas poder ser bastante complicada, demandando um alto custo computacional.

Há casos que envolvem a otimização de mais de um objetivo (*otimização multiobjetivo*). Uma abordagem simples para tratar de um conjunto de funções objetivo f_1, f_2, \dots, f_n , é formar uma nova função, obtida da soma ponderada das funções (GALVÃO e VALENÇA, 1999), ou seja:

$$F = \sum_{i=1}^n w_i f_i, \quad (39)$$

em que w_i é um peso que pode ser usado para dar mais relevância a uma função do que às outras, ou para compatibilizar ordens de grandeza distintas. O ajuste dos fatores de peso pode ser feito praticamente de forma manual.

4.3.4 Reprodução

A reprodução compreende três etapas. A primeira compreende a **seleção** dos pais. Em seguida, mistura-se o código genético dos pais na etapa de **cruzamento**. Conclui-se a reprodução com a etapa de **mutação**, que é essencial para manter a diversidade da população e explorar novas regiões do espaço de busca em busca de melhores resultados.

4.3.4.1 Seleção

A seleção é uma etapa fundamental para o bom desempenho do algoritmo. Uma boa seleção deve favorecer os bons indivíduos sem causar uma convergência muito rápida da população na direção dos melhores indivíduos.

A forma de seleção mais utilizada na literatura é a *seleção por roleta ponderada*, ou *seleção estocástica com reposição*. Nesta seleção, os indivíduos que passarão suas características genéticas à próxima geração são escolhidos a partir de um sorteio, onde a chance de um indivíduo ser escolhido é proporcional ao seu índice de adaptação. Com isso, privilegiam-se os melhores cromossomos.

A Figura 8 ilustra a criação de uma roleta ponderada para uma população de cinco indivíduos. Neste exemplo, cada indivíduo é representado na roleta por uma área proporcional à sua aptidão, enquanto a área total da roleta representa a soma de todas as aptidões. Um número aleatório entre 0 e a soma das aptidões, representando uma rodada na roleta, é sorteado. O pai (cromossomo) equivalente a este número é então sorteado para o cruzamento. Ainda que este processo seja aleatório, ele irá privilegiar aqueles indivíduos que possuem maior aptidão, pois ocuparão uma área maior da roleta.

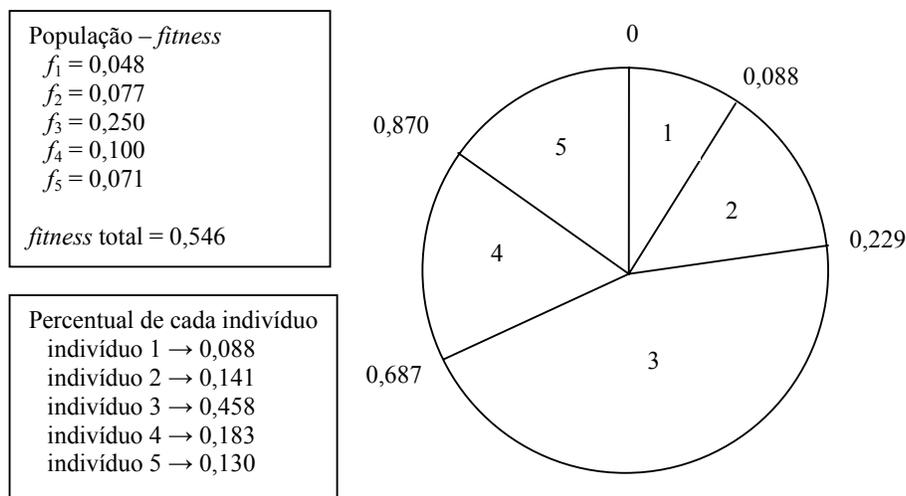


Figura 8. Exemplo de uma seleção pelo método da *roleta ponderada*.

O que pode acontecer, é que, se o melhor indivíduo da primeira geração for muito superior aos demais, o algoritmo irá convergir para regiões muito próximas àquele, ainda que ele não seja uma boa solução para o problema. A pressão seletiva nesse caso é muito alta.

Uma forma de se diminuir a pressão seletiva é escolher outras formas de seleção, ou realizar o escalonamento da função de aptidão. Uma forma bastante usual de seleção com menor pressão seletiva é a *seleção por torneio*. Na seleção por torneio, sorteia-se de forma aleatória um determinado número (normalmente um par) de indivíduos e se compara suas aptidões. O “vencedor” é então armazenado enquanto o “perdedor” é recolocado na população. Repete-se o processo para que se tenha dois “vencedores”. Estes serão então cruzados. Este processo ainda mantém a aleatoriedade, parte importante em AG, mas não privilegia tanto o mais adaptado, pois ele deverá ser sorteado aleatoriamente.

A literatura apresenta inúmeros outros tipos de seleção (ALVES, 2003; GALVÃO e VALENÇA, 1999).

4.3.4.2 Cruzamento

Assim como para a seleção, existem diversos operadores de cruzamento. De uma maneira geral, a idéia é misturar informações genéticas de dois indivíduos, originando um terceiro. O tipo de cruzamento depende do tipo de representação adotada.

Para a codificação binária o *cruzamento simples*, ou *cruzamento a um ponto* é um dos operadores de cruzamento mais comuns. Neste tipo de operador, um *ponto de corte* no cromossomo é escolhido aleatoriamente. Um filho herda a informação genética do “pai” até este ponto, e da “mãe” a partir deste mesmo ponto. O outro filho herda a informação genética da “mãe” até este ponto, e do “pai” a partir deste mesmo ponto. Ou seja, o cruzamento simples troca, a partir de um ponto qualquer do cromossomo, o código genético dos pais. Assim, as informações genéticas dos indivíduos mais adaptados se propagarão. A Figura 9 ilustra este procedimento.

4.3.5 Renovação da população

A renovação consiste em formar uma nova geração, substituindo indivíduos antigos (pais), pelos novos indivíduos (filhos) gerados no processo de reprodução. A forma como é feita a renovação pode variar, especialmente no que diz respeito à porcentagem de pais a ser substituída.

Os AG mais simples eliminam 100% dos pais, não havendo assim superposição entre as gerações. Alguns AG usam, no entanto, uma taxa de renovação que varia de 30 a 70%.

Outro ponto bastante importante na etapa de renovação é conhecido por **Elitismo**. Para que não se perca durante o processo boas soluções, uma vez em que no AG sempre teremos envolvido um certo grau de aleatoriedade, a pior solução de uma geração é automaticamente substituída pela melhor solução da geração anterior.

4.3.6 Critério de parada

Os critérios de parada mais utilizados são: (a) atingir um número dado de gerações; (b) convergência de indivíduos, seja em termos de genes ou de aptidão; (c) parada no momento em que um indivíduo com uma aptidão satisfatória seja encontrado.

4.4 O Algoritmo Microgenético

Os algoritmos microgenéticos são originados dos algoritmos genéticos e muitas de suas características são semelhantes (ALVES, 2003; SOUZA et al, 2004). O mecanismo básico de funcionamento de um algoritmo microgenético é apresentado esquematicamente na Figura 11.

O tamanho da população e o número de vezes que ela é criada são os principais fatores que diferenciam os algoritmos genéticos e microgenéticos, que exploram a possibilidade de se trabalhar com pequenas populações para reduzir o tempo de processamento.

Nos algoritmos microgenéticos cada vez que a população de tamanho T se torna homogênea, ou seja, quando a diferença entre os bits de cada indivíduo da população for menor que uma tolerância pré-definida, o indivíduo mais bem adaptado migra para uma nova população, também criada aleatoriamente, de tamanho $T - 1$. Este é o mecanismo utilizado para manter a diversidade genética e evitar a convergência para ótimos locais. O que torna desnecessário o emprego da etapa de mutações.

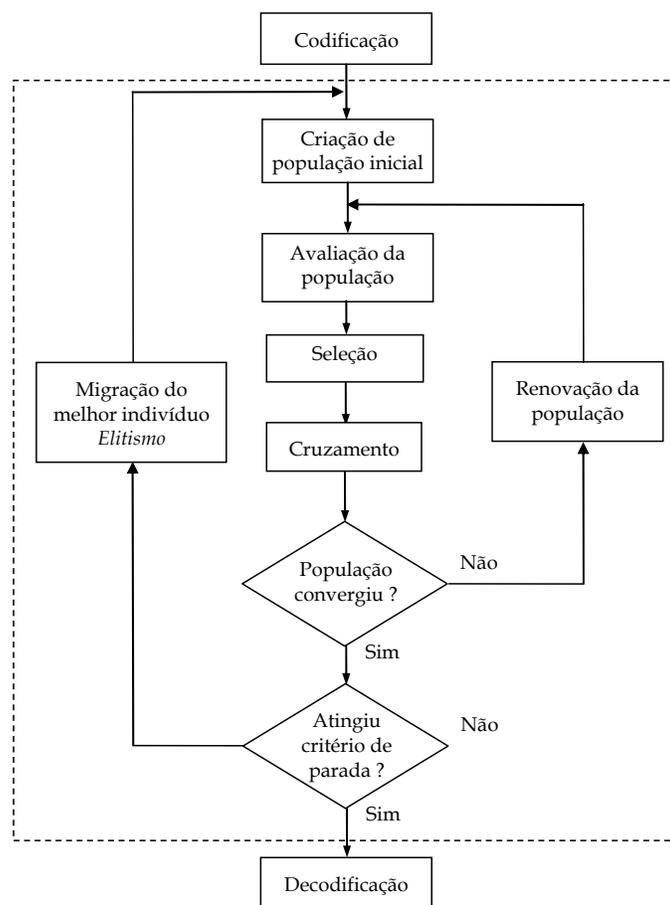


Figura 11. Fluxograma de um Algoritmo Microgenético.

Considerando o número máximo de migrações, n_m , o número máximo de gerações de uma mesma população, n_g , e o número de indivíduos na população, n_i , a função de adaptação será calculada um número máximo de $n_m \times n_g \times n_i$ vezes durante o processo. Como o número de gerações necessárias para atingir a

convergência de cada população, e o número indivíduos de cada população, são pequenos, os algoritmos microgenéticos tendem a ser mais rápidos que os algoritmos genéticos para atingir o ótimo global.

O método do torneio sem reposição é a principal forma de seleção utilizada nos algoritmos microgenéticos. Na seleção estocástica por torneio, pares de indivíduos são escolhidos aleatoriamente com reposição (método da roleta) ou sem reposição. Cada par concorre entre si (torneio) e o mais adaptado é escolhido para participar da reprodução. Esse processo se repete até a população para reprodução ser completamente preenchida.

O método do torneio garante que todos os cromossomos poderão ser escolhidos para o torneio independente da sua aptidão, a qual só é levada em conta depois de sorteadas as duplas. Essa característica é muito importante nos algoritmos microgenéticos visto que quando ocorre a migração do melhor indivíduo de uma população para outra, a tendência é que esse indivíduo, já evoluído, tenha um grau de aptidão bem superior aos outros cromossomos criados aleatoriamente. O método do torneio garante que mesmo assim, todos os cromossomos tenham chances de participar da reprodução.

Capítulo 5

Algoritmos Propostos

Neste capítulo são apresentados os detalhes dos algoritmos genéticos e microgenéticos propostos.

As etapas de codificação e avaliação da população são idênticas para ambos os algoritmos, já que os mecanismos básicos de funcionamento destes algoritmos evolutivos são semelhantes.

5.1 Codificação dos parâmetros do problema

Na codificação dos cromossomos empregou-se o alfabeto binário, de modo que a representação das soluções potenciais está inserida diretamente nos cromossomos, que são constituídos por cadeias de genes. Em nível computacional cada cromossomo é visto como um vetor de bits.

Para cada estratégia de alocação dos filtros harmônicos, é necessário adotar uma nova codificação dos cromossomos, para representar adequadamente cada solução proposta, embora os algoritmos evolutivos implementados possam ser aplicados sem restrições a todos os tipos de cromossomos.

Para a estratégia de alocação dos filtros em barras diferentes do sistema de distribuição, adotou-se um cromossomo formado por pares de genes. Na primeira

cadeia de genes codificam-se as informações sobre a barra de instalação de cada filtro harmônico. Na segunda cadeia de genes, codificam-se os números de módulos capacitivos com o qual cada filtro harmônico será dimensionado. Dessa forma, a posição relativa de cada gene no cromossomo indica de qual filtro é a informação apresentada.

A vantagem dessa forma de codificação é ser compacta, o que evita a ocorrência de muitos cromossomos imperfeitos, e permitir, ao mesmo tempo, um esquema com a formação de bons blocos construtivos (GOLDBERG, 1989), acelerando a convergência do algoritmo.

A desvantagem é a necessidade de fixar previamente o número de filtros e módulos capacitivos disponíveis para instalação. Contudo, o tamanho efetivo do cromossomo (número de bits) é automaticamente estabelecido conforme os parâmetros do problema. Por exemplo, para instalação de 2 filtros harmônicos num alimentador de 48 barras, dispondo-se de um máximo de 30 módulos capacitivos, será criado um cromossomo com 22 bits. Pois, nesse caso, são necessários 6 bits para codificar o número de barras e 5 bits para codificar o número de módulos capacitivos de cada filtro.

Na Figura 12 apresenta-se a estrutura de um cromossomo implementado dessa maneira, com a representação de uma solução para a instalação de 3 filtros passivos.

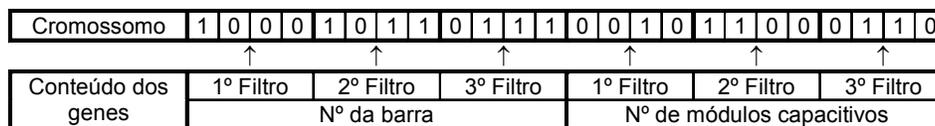


Figura 12. Estrutura de um cromossomo para projeto de 3 filtros harmônicos em barras distintas do sistema.

No cromossomo representado na Figura 12, a primeira cadeia de genes informa a localização dos filtros nas barras do alimentador. A cadeia de genes seguinte informa o número de módulos capacitivos de cada filtro passivo. Assim, o cromossomo exemplificado aqui, indica que o 1º filtro deverá ser instalado na

barra 8 e possuir 2 módulos capacitivos. O segundo filtro passivo deverá ser instalado na barra 11, contendo 12 módulos capacitivos. E, finalmente, o 3º filtro passivo deverá ser instalado na barra 7, com 6 módulos capacitivos.

Para a estratégia de alocação dos filtros em uma única barra do sistema de distribuição, formando um filtro composto, adotou-se um cromossomo codificado da seguinte forma: na primeira cadeia de genes codificam-se as informações sobre a barra de instalação do filtro harmônico composto. Nas cadeias de genes seguintes, codificam-se os números de módulos capacitivos com o qual cada ramo do filtro harmônico composto será dimensionado.

Na Figura 13 apresenta-se a estrutura de um cromossomo implementado dessa maneira, com a representação de uma solução para a instalação de um filtro passivo composto com 3 ramos.



Figura 13. Estrutura de um cromossomo para projeto de 3 filtros harmônicos numa única barra do sistema.

5.2 Função de adaptação

A função de adaptação quantifica a aptidão de cada indivíduo na população corresponde.

Usualmente, o objetivo do problema de planejamento de filtros passivos é minimizar a distorção harmônica total de tensão no sistema. Porém, os algoritmos evolutivos proporcionam a maximização da função de adaptação dos indivíduos. Assim, é necessário transformar a minimização da DHT_v em uma função de adaptação de maximização correspondente.

Algumas considerações importantes foram observadas para a criação da função de adaptação: (a) Durante o processo de evolução, soluções ruins - com valores de distorção harmônica ainda mais elevados - também podem ser encontradas. (b) Para o esquema de seleção adotado (roleta ponderada), é necessário que a função de adaptação produza sempre valores positivos. (c) Pode-se abordar mais de um objetivo numa mesma função de adaptação.

Assim, criou-se uma função de adaptação, f , que computa a redução ponderada da máxima distorção harmônica total de tensão ($DHTv$) e das perdas ativas no sistema de distribuição, da seguinte forma:

$$f = w_1 \left(\frac{100 - \max\{DHTv_i\}}{100} \right) + w_2 (1 - P_i) - \tau, \quad 1 \leq i \leq N. \quad (40)$$

Sendo:

$DHTv_i$, a distorção harmônica total de tensão (%), na barra i ;

N , o número de barras (trechos) do alimentador;

P_i , a perda ativa total no alimentador (p.u.);

w_1, w_2 , constantes de peso;

τ , adicional de penalidade.

As constantes w_1 e w_2 são estipuladas e determinam uma relação de compromisso entre os dois objetivos a serem maximizados.

O adicional de penalidade é empregado para incluir algumas restrições do problema - controlar o número máximo de módulos a serem utilizados nos filtros, evitando a sobrecompensação reativa no sistema. O adicional de penalidade é estipulado da seguinte forma:

$$\tau = \begin{cases} 0, & k_C \leq k_{C_{\max}} \\ \frac{k_C - k_{C_{\max}}}{k_{C_{\max}}}, & k_C > k_{C_{\max}} \end{cases}. \quad (41)$$

em que k_C é o número total de módulos capacitivos utilizados na solução associada ao indivíduo em teste, e $k_{C_{\max}}$ é o número máximo de módulos capacitivos permitidos para instalação, para evitar a sobrecompensação reativa do

sistema. No caso da solução em teste incluir a localização de filtros em barras onde existam bancos de capacitores, o valor de $k_{C_{\max}}$ é corrigido.

O uso do adicional de penalidade pode acarretar valores negativos na função de adaptação, isto inviabiliza o emprego da seleção pelo método da roleta. Para evitar este tipo de problema, utiliza-se um deslocamento da saída para tirá-la da região dos números negativos, ou seja, o módulo da menor saída negativa é somado em todas as saídas, de tal forma que a menor saída terá então valor nulo.

O fluxograma do algoritmo empregado para o cálculo da função de adaptação é mostrado na Figura 14. Os parâmetros utilizados neste algoritmo são obtidos com a decodificação das informações contidas em cada cromossomo da população.

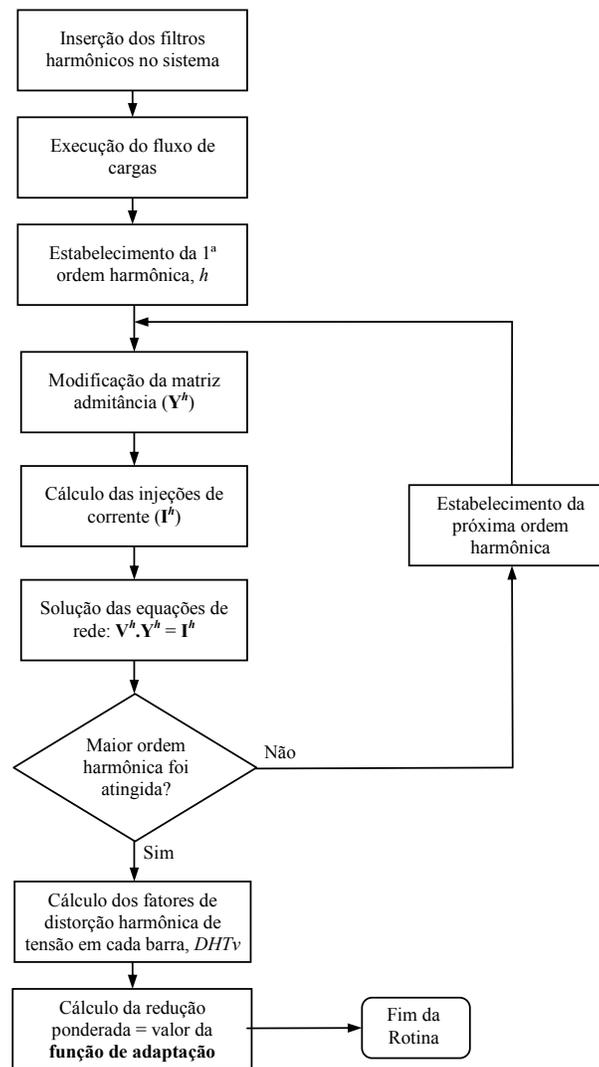


Figura 14. Fluxograma do cálculo da função de adaptação.

5.3 O algoritmo genético implementado

O algoritmo genético implementado neste estudo é esquematizado no fluxograma da Figura 15. Neste algoritmo, a população inicial é criada aleatoriamente, mas composta apenas por indivíduos “sadios” – aqueles cujas soluções são realmente factíveis.

Na seleção, emprega-se o método da roleta, no qual os cromossomos são escolhidos aleatoriamente, mas de modo que aqueles com melhor adaptação

tenham mais probabilidade de serem escolhidos para reprodução (Ferreira et al, 2002).

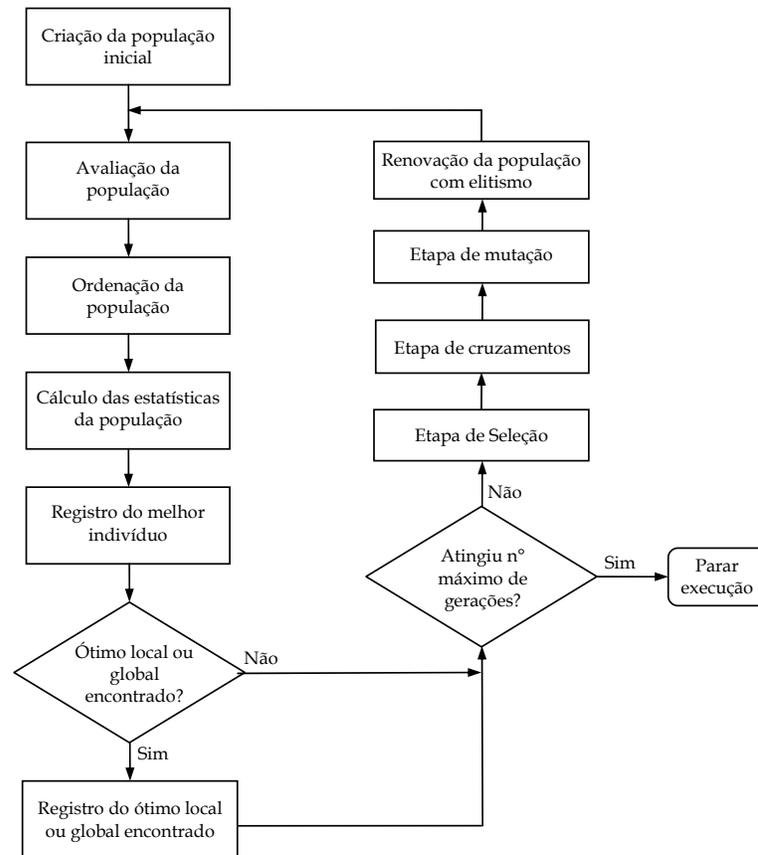


Figura 15. Fluxograma do algoritmo genético implementado.

Na etapa de cruzamento emprega-se o operador de cruzamento simples com um único ponto de corte escolhido aleatoriamente. Este tipo de cruzamento apresenta bons resultados para a representação binária adotada nos cromossomos deste estudo (GOLDBERG, 1989).

Para mutação foi adotado o operador de mutação simples, conforme taxa pré-estabelecida.

As populações são estacionárias, ou seja, cada geração começa e termina do mesmo tamanho. É utilizado o elitismo.

A cada iteração, o algoritmo calcula algumas estatísticas da população, como número de mutações e cruzamentos efetuados e índices máximo, médio e mínimo de adaptação, e convergência de indivíduos em termos de genes.

Como critério de parada adotou-se a convergência dos genes dos indivíduos da população, ou seja, o critério de parada é atingido quando a diferença entre os bits de cada indivíduo da população for menor que uma tolerância pré-definida. Também se aplica como critério de parada um número máximo de iterações, para evitar um excessivo tempo de processamento nos casos em que a convergência não tenha sido alcançada.

5.4 Características do algoritmo microgenético implementado

O algoritmo microgenético implementado neste estudo é esquematizado no fluxograma da Figura 16.

As etapas de criação da população inicial, seleção, cruzamento e critério de parada, são idênticas aos do algoritmo genético, e não se emprega mutação.

As populações também são estacionárias, ou seja, cada geração começa e termina do mesmo tamanho, com a utilização de elitismo na migração do indivíduo para as novas populações.

Quando a diferença entre os bits de cada indivíduo da população é menor que uma tolerância pré-definida, o indivíduo mais bem adaptado migra para uma nova população, também criada aleatoriamente.

Como critério de parada, verifica-se se um mesmo indivíduo migra para uma nova população um determinado número de vezes. Também se aplica como critério de parada um número máximo de iterações, usado nos casos em que a convergência não tenha sido alcançada.

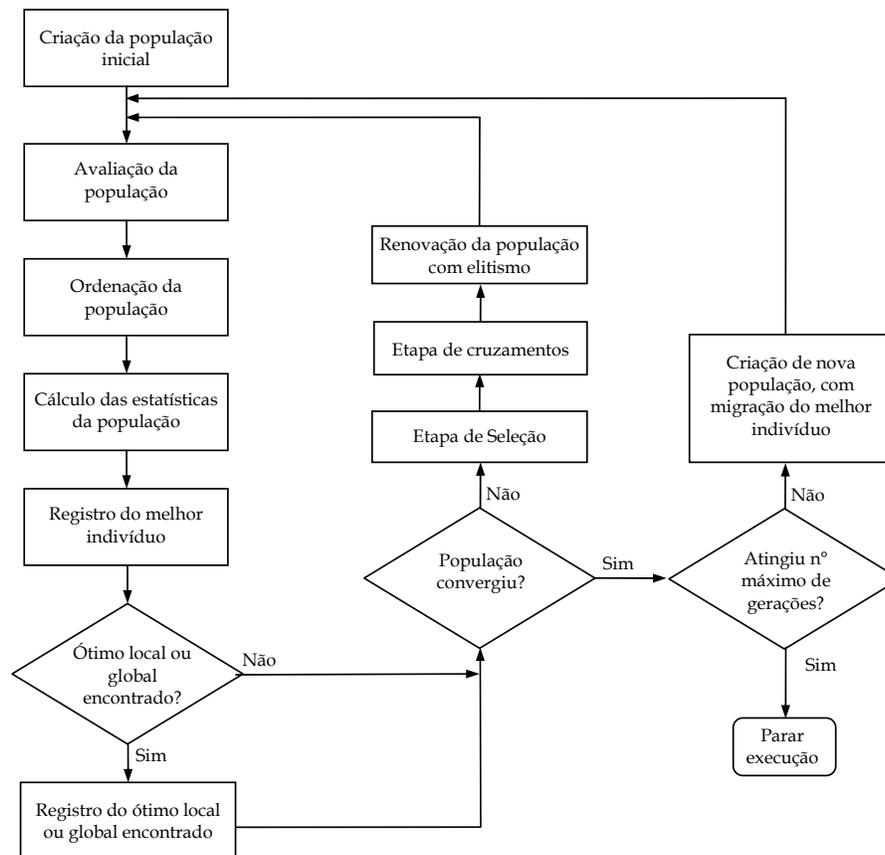


Figura 16. Fluxograma do algoritmo microgenético implementado.

Capítulo 6

Estudos de Casos

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na aplicação dos algoritmos propostos a um sistema de distribuição muito utilizado na literatura que trata do planejamento de filtros harmônicos passivos.

Para implementação computacional foi adotado um compilador FORTRAN 90, que, dentre outros recursos, apresenta ferramentas para programação orientada ao objeto e manipulação de matrizes e vetores. A utilização da programação orientada ao objeto apresenta as seguintes vantagens: estrutura de dados bem organizada, menor risco de erro e melhoria da eficiência computacional. Neste trabalho, as rotinas foram implementadas incorporando esta técnica.

Inicialmente compara-se o desempenho dos algoritmos genético e microgenético e a influência na variação dos parâmetros da função de adaptação. Em seguida, avaliam-se os resultados obtidos com a consideração das variações das cargas lineares e não lineares no planejamento dos filtros; as variações na modelagem das cargas lineares; e as variações na estratégia de alocação dos filtros.

Também são apresentados os resultados alcançados no planejamento de um sistema de distribuição de proporções compatíveis a de um sistema real.

6.1 Sistema teste

Para realizar os estudos de caso apresentados neste capítulo foi adotado o sistema de distribuição com dois alimentadores e dezoito barras utilizado nos trabalhos de Chang et al (2004), Zhao et al (2004), Keypour et al (2004), Chang e Chang (2000), Grady et al (1991), entre outros. As bases do sistema são: tensão 12,5 kV e potência 10 MVA. Os dados relativos ao sistema são apresentados nas Tabelas 5 e 6.

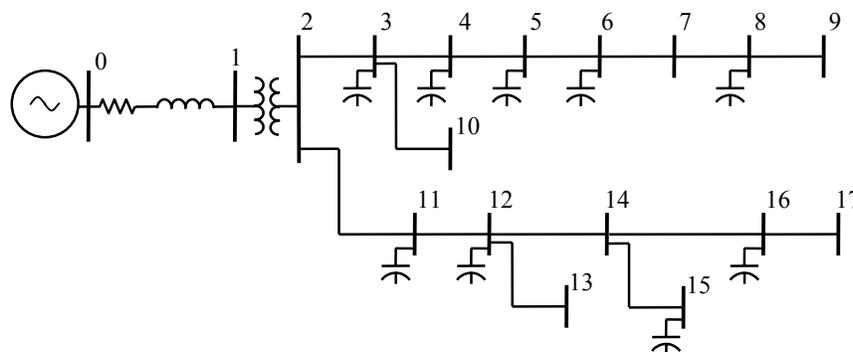


Figura 17. Sistema de distribuição radial de 18 barras.

Como a numeração de barras e as cargas harmônicas diferem nos diversos trabalhos da literatura, apresenta-se na Figura 17 o sistema com a numeração aqui adotada. Foi adotada a especificação de Chang et al (2004) para as cargas não lineares e seus respectivos espectros de correntes harmônicas (Tabela 7).

Tabela 5. Dados de linha do sistema de 18 barras.

Da barra	Para Barra	R (Ω/km)	X_L (Ω/km)	Comp. (km)	Da barra	Para Barra	R (Ω/km)	X_L (Ω/km)	Comp. (km)
0	1	0,007813	0,05375	-	3	10	0,266563	0,34516	0,451
1	2	0,048750	1,05516	-	2	11	0,454688	0,58875	0,769
2	3	0,067344	0,18813	0,318	11	12	0,347188	0,44953	0,587
3	4	0,093906	0,26203	0,443	12	13	0,750469	0,97156	1,269
4	5	0,049375	0,13781	0,223	12	14	0,622656	0,80625	1,053
5	6	0,140000	0,39094	0,661	14	15	0,454688	0,58875	0,769
6	7	0,046094	0,12875	0,218	14	16	0,582344	0,71766	0,985
7	8	0,268750	0,33125	0,455	16	17	0,345000	0,42500	0,583
8	9	0,635938	0,47703	0,568	-	-	-	-	-

De forma geral, o problema consistirá em realizar o planejamento de filtros harmônicos passivos para minimizar as distorções harmônicas totais de tensão e perdas no sistema de distribuição. Para a composição dos filtros, são utilizados módulos capacitivos de potência 100 kvar cada.

Tabela 6. Dados de carga linear, carga não linear e bancos de capacitores do sistema de 18 barras.

Barra	\bar{P} (kW)	\bar{Q} (kvar)	\check{P} (kW)	\check{Q} (kvar)	Q_{sh} (kvar)
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	200	120	0	0	600
4	400	250	0	0	600
5	1.500	930	0	0	600
6	0	0	3.000	2.260	1.800
7	800	500	0	0	0
8	200	120	0	0	600
9	1.000	620	0	0	0
10	500	310	0	0	0
11	1.000	620	0	0	600
12	300	190	0	0	600
13	200	120	0	0	0
14	800	500	0	0	0
15	500	310	0	0	600
16	1.000	620	0	0	600
17	200	120	0	0	0

Tabela 7. Espectro das correntes harmônicas.

Barra	Valor % / Ordem harmônica							
	5	7	11	13	17	19	23	25
6	20,0∠-67,8°	14,3∠11,9°	9,1∠-7,13°	7,7∠68,6°	5,9∠46,5°	5,3∠116,4°	4,3∠87,5°	4,0∠159,3 °

6.2 Validação das rotinas de fluxo de carga e de harmônicas

Para efeito de validação das rotinas de fluxo de carga e de harmônicas, seus resultados foram comparados com os resultados obtidos pelo programa PCFLO (GRADY, 2000), empregado em alguns trabalhos na literatura (CHANG et al, 2004; KEYPOUR et al, 2004; CHANG e CHANG, 2000; GRADY et al, 1991). As rotinas foram executadas num computador equipado com processador Athlon XP 1700 e 256 MB de memória SDRAM.

Diversos casos foram analisados para efeito de validação, constatando-se uma divergência máxima de 7,2 % nos resultados. Esta divergência foi considerada admissível, visto que métodos diferentes dos adotados neste trabalho podem ter sido empregados no cálculo do fluxo de harmônicas, principalmente nos modelos empregados na representação de todos os componentes do sistema.

Os resultados do fluxo de carga para uma simulação com o sistema teste de 18 barras são apresentados na Figura 18.

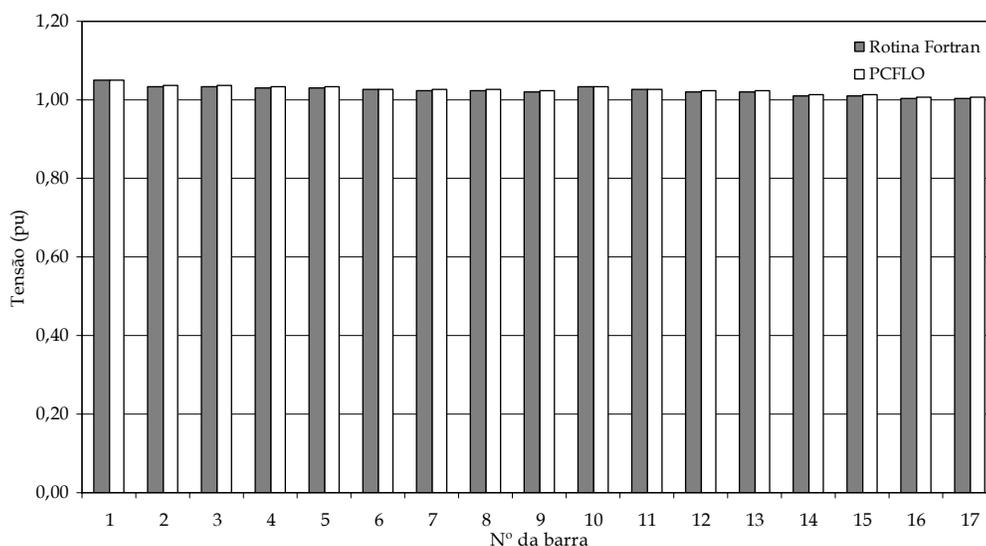


Figura 18. Comparação dos resultados de fluxo de potências.

Na Figura 19 é apresentada uma comparação dos resultados de distorção harmônica total de tensão para o sistema teste de 18 barras. É interessante observar a ocorrência de significativas distorções de tensão em barras remotas,

inclusive no alimentador adjacente ao que contém a carga não linear do sistema (barra 6). Isto mostra que é importante modelar todos os alimentadores conectados ao mesmo transformador (da subestação) do sistema em análise, nos estudos de fluxo de harmônicas em sistemas de distribuição.

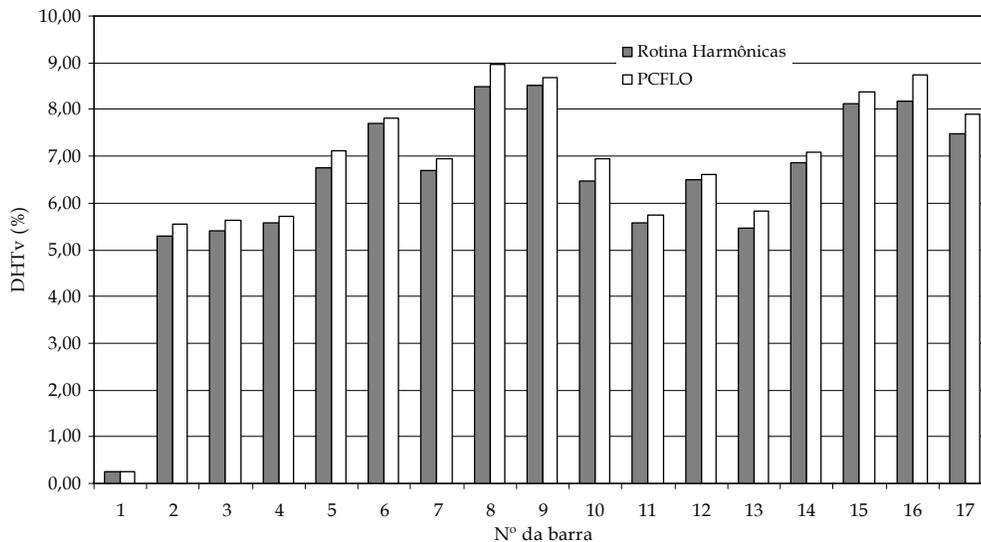


Figura 19. Comparação dos resultados de fluxo de harmônicas.

6.3 Caso 1 - Variações do Algoritmo Evolutivo Aplicado e dos Parâmetros da Função *fitness*

Neste estudo de caso, são comparados os resultados obtidos com a aplicação dos dois algoritmos evolutivos implementados: o algoritmo genético e o algoritmo microgenético, descritos no capítulo anterior. O objetivo é verificar o desempenho de cada algoritmo para o planejamento de 2 filtros passivos, sendo um de 5ª e um de 7ª ordem.

Os valores de tensão e distorção harmônica total de tensão em cada barra do sistema, na sua configuração original são apresentados na Tabela 8 e Figura 20. Neste estudo de caso considerou-se apenas a condição de carga de pico (carga máxima) e as cargas lineares foram modeladas por meio do modelo *RL* paralelo,

que é o modelo mais empregado na literatura e foi aqui considerado para comparação de resultados.

Pode-se observar que a $DHTv$ em algumas barras ultrapassam o limite adotado como referência nesse estudo, $DHTv \leq 5\%$ (IEEE STANDARD 519, 1992), tornando necessária a aplicação de filtros para redução dos índices de distorção harmônica.

Tabela 8. Tensões e $DHTv$ na configuração original do sistema - estudo de Caso 1.

Barra	$ U $ (pu)	$DHTv$ (%)	Barra	$ U $ (pu)	$DHTv$ (%)
1	1,049	0,266	10	1,033	6,770
2	1,035	5,551	11	1,025	5,856
3	1,033	5,665	12	1,021	6,802
4	1,031	5,869	13	1,019	5,739
5	1,030	7,040	14	1,009	7,162
6	1,025	7,947	15	1,009	8,382
7	1,025	7,060	16	1,004	8,441
8	1,024	8,790	17	1,003	7,847
9	1,021	8,814	-	-	-

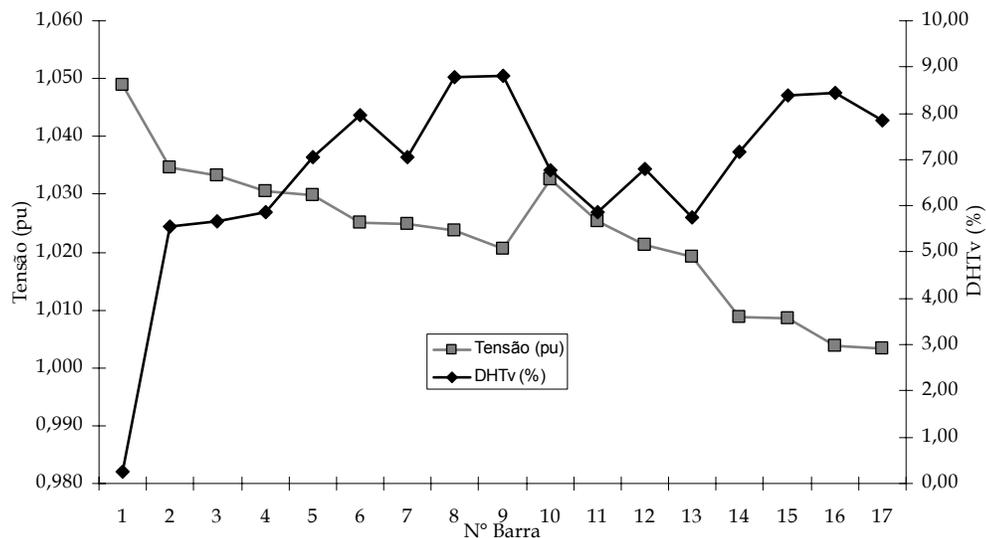


Figura 20. Tensões e $DHTv$ na configuração original do sistema - estudo de caso 1.

A estratégia de alocação dos filtros adotada para este estudo de caso foi considerar a alocação de filtros em barras distintas do sistema de distribuição. Não

se admitiu a instalação de bancos de capacitores e filtros harmônicos numa mesma barra. Assim, durante a execução do algoritmo, quando uma determinada solução propõe a alocação de um filtro harmônico em uma barra onde exista um banco de capacitores, procede-se a retirada do banco de capacitores e sua substituição pelo filtro harmônico. Todavia, como a capacidade de potência reativa do filtro é ajustada automaticamente pelo algoritmo, para prover a máxima redução de distorção harmônica de tensão, esta não será, necessariamente, a mesma do banco de capacitores originalmente instalado na barra. Esta é uma abordagem diferente da empregada pelos estudos apresentados na literatura (CHANG et al, 2004; DAS, 2004; CHANG et al, 2002; LIN et al, 1998) que mantém a mesma capacidade reativa fornecida pelo banco de capacitores, ajustando os parâmetros de indutância e frequência de ressonância do filtro.

6.3.1 Parâmetros dos algoritmos genético e microgenético

Para o algoritmo genético, estipularam-se o número máximo de 600 gerações, o número de indivíduos da população igual a 80 e taxas de cruzamento e mutação de 80% e 3%, respectivamente.

Para o algoritmo microgenético, estipularam-se: número máximo de 1.200 gerações (incluindo todas as possíveis migrações entre populações), 10 indivíduos em cada população e taxa de cruzamento de 80%.

Como o critério de parada em ambos os algoritmos é baseado na convergência da população, cuja taxa de convergência foi adotada para 95% de genes idênticos, e a geração da população inicial é aleatória, os algoritmos apresentam uma convergência diferente a cada execução. Dessa forma, são apresentados neste trabalho os melhores resultados obtidos em 20 simulações efetuadas para cada caso de estudo. O tempo de processamento apresentado corresponde à média dos tempos de processamento de todas as simulações efetuadas para cada estudo de caso.

6.3.2 Resumo dos resultados

A Tabela 9 resume os resultados obtidos para cinco subcasos distintos:

- a) Sistema em sua configuração original, sem a instalação de nenhum filtro harmônico;
- b) Aplicando algoritmos genéticos, com as variáveis de peso na função de adaptação sendo: $w_1 = 10$ e $w_2 = 1$, proporcionando ênfase na redução da $DHTv$;
- c) Aplicando algoritmos genéticos, com $w_1 = 1$ e $w_2 = 10$, proporcionando ênfase na redução da perda ativa total, P_i ;
- d) Aplicando algoritmos microgenéticos, com $w_1 = 10$ e $w_2 = 1$;
- e) Aplicando algoritmos microgenéticos, com $w_1 = 1$ e $w_2 = 10$.

Tabela 9. Resumo dos resultados obtidos no estudo de caso 1.

Parâmetro	Configuração Original (a)	Algoritmo genético		Algoritmo microgenético	
		(b)	(c)	(d)	(e)
Melhor Cromossomo	---	5-11-15-1	6-11-21-1	5-11-15-1	6-11-21-1
<i>fitness</i>	---	10,7836	10,8128	10,7836	10,8128
$\max\{DHIv\}$ (%)	7,29	1,80	1,84	1,80	1,84
$\max\{DHTv\}$ (%)	8,81	1,99	2,11	1,99	2,11
$\max\{ V \}$ (p.u.)	1,049	1,049	1,049	1,049	1,049
$\min\{ V \}$ (p.u.)	1,003	0,997	1,010	0,997	1,010
Perdas - P_i (p.u.)	0,169	0,173	0,166	0,173	0,166
<i>Tempo médio de Processamento</i> (s)	---	14,35	15,21	6,92	6,67

Pode-se observar que ambos os algoritmos encontram a mesma solução, para uma mesma ponderação da função *fitness*. Contudo, o tempo médio de processamento do algoritmo microgenético é inferior ao tempo consumido pelo algoritmo genético, pois necessita realizar menos fluxos harmônicos durante o processo de busca da melhor solução (BERIZZI e BOVO, 2000).

A eficiência computacional dos algoritmos é considerada muito boa, pois os tempos de processamento aqui apresentados são bastante inferiores aos

apresentados nos trabalhos de Chang e Chang (1998) e Richards e Yang (1993), embora devam ser consideradas as diferenças na metodologia de cada método. Chang e Chang (1998) aplicaram uma heurística evolutiva (método da *Evolução Diferencial*) ao planejamento de filtros harmônicos passivos, consumindo um tempo médio de processamento de, aproximadamente, 2400 s, no planejamento de 3 filtros passivos, num sistema de 9 barras. O tempo médio de processamento do método apresentado por Richards e Yang (1993) para um sistema de 25 barras foi de, aproximadamente, 15 minutos.

A localização e os parâmetros dos filtros harmônicos sintonizados são apresentados na Tabela 10. Estes resultados são obtidos com a decodificação dos melhores cromossomos obtidos em cada caso simulado.

Tabela 10. Parâmetros dos filtros harmônicos - estudo de caso 1.

Caso	1º filtro				2º filtro			
	Barra	R (Ω)	L (mH)	C (μ F)	Barra	R (Ω)	L (mH)	C (μ F)
(b) e (d)	5	0,07	9,33	35,65	11	0,75	99,93	1,70
(c) e (e)	6	0,10	13,06	24,46	11	0,75	99,93	1,70

A aplicação dos filtros harmônicos nos casos (b) e (d) não promoveu melhora no perfil de tensão do alimentador nem redução de perdas, pois a compensação reativa no sistema foi ligeiramente reduzida para proporcionar a máxima redução dos índices de distorção de tensão. Na Figura 21 apresenta-se o perfil de tensão nas barras do sistema, com a aplicação dos filtros harmônicos.

Na Figura 22 apresentam-se os valores de distorção harmônica total de tensão nas barras do alimentador, em sua configuração original e com a aplicação dos filtros harmônicos, seja com ênfase na redução da distorção harmônica ($w_1 = 10$ e $w_2 = 1$), ou com ênfase na redução das perdas ($w_1 = 1$ e $w_2 = 10$). Estes resultados são condizentes com os apresentados por Chang et al (2002), no planejamento do mesmo número de filtros sintonizados.

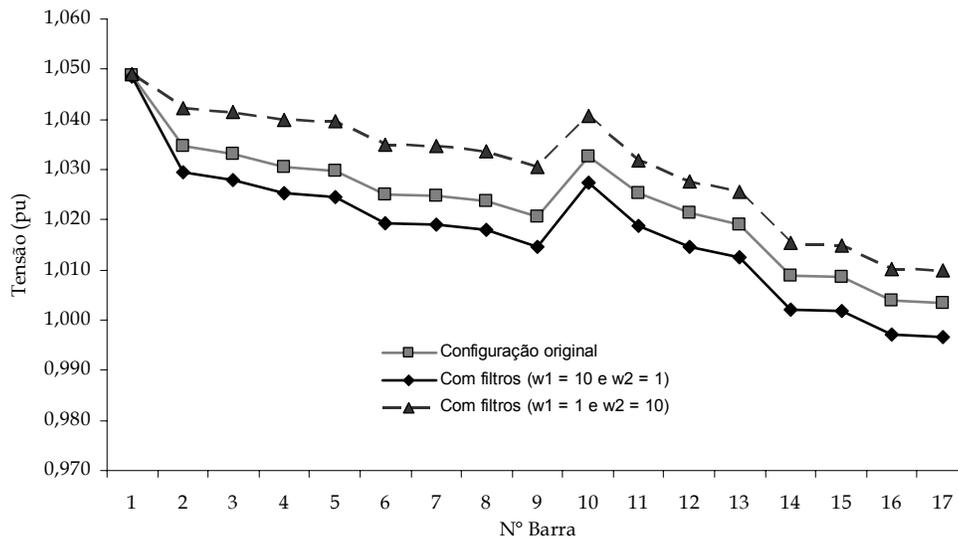


Figura 21. Perfil de tensão com aplicação dos filtros - estudo de caso 1.

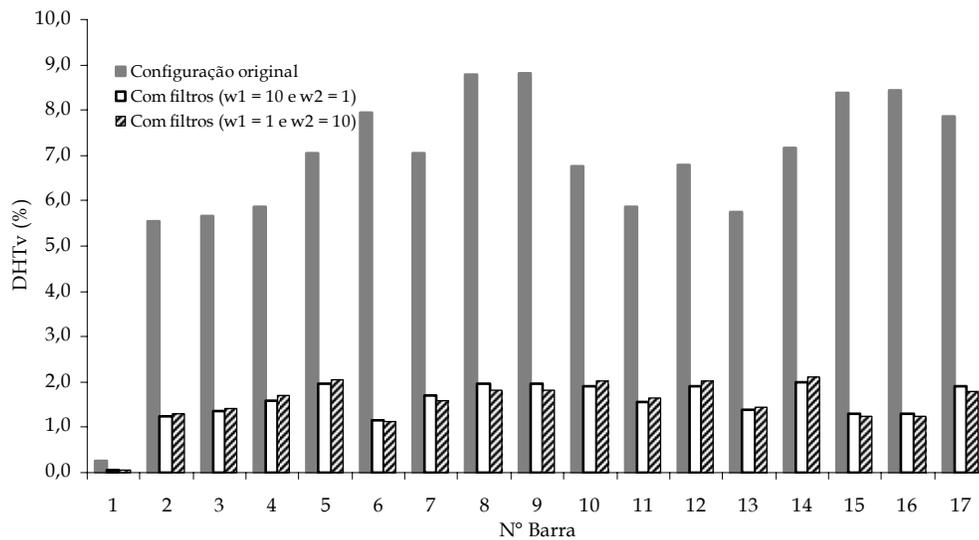


Figura 22. $DHTv$ no sistema com aplicação dos filtros - estudo de caso 1.

Embora a solução nos casos (b) e (d) proporcione o menor índice de distorção harmônica total de tensão ($DHTv$), a solução com ênfase na redução de perdas também apresentou resultados muito próximos.

Observa-se que a redução da distorção harmônica e das perdas totais no alimentador, com a conseqüente melhoria no perfil de tensão, refletem uma

relação de compromisso na estratégia usada no planejamento, que pode ser ajustada de acordo com os valores estipulados para as constantes de peso w_1 e w_2 na função de adaptação.

Verifica-se que os algoritmos genéticos e os algoritmos microgenéticos são ferramentas heurísticas de otimização combinatória que se adequam muito bem ao problema do planejamento de filtros harmônicos. Todavia, os algoritmos microgenéticos se mostraram mais eficazes na solução do problema, por apresentar os mesmos resultados, com menor tempo de processamento. Dessa forma, o algoritmo microgenético foi adotado como a ferramenta de otimização nos demais estudos de caso a seguir apresentados.

6.4 Caso 2 – Variações das cargas lineares e não lineares

Para analisar os efeitos da variação das cargas lineares e não lineares no planejamento de filtros passivos se utilizou uma curva segmentada em três níveis (carga de pico, carga média e carga leve), de valores hipotéticos indicados na Tabela 11. As cargas lineares foram modeladas por meio do modelo *RL* paralelo.

Tabela 11. Fatores correspondentes à curva de carga adotada no estudo de caso 2.

Patamar da curva de carga	Carga de pico	Carga média	Carga leve
Fator de carga	1,00	0,60	0,30
Duração (h)	4,0	8,0	12,0

A estratégia de alocação dos filtros adotada para este estudo de caso foi, novamente, considerar a alocação de filtros em barras distintas do sistema de distribuição. Também não se admitiu a instalação de bancos de capacitores e filtros harmônicos numa mesma barra.

Os parâmetros adotados para execução do algoritmo microgenético foram: número máximo de 1.200 gerações, população com 10 indivíduos, taxa de cruzamento de 80% e taxa de convergência da população igual a 95%.

6.4.1 Condições analisadas

Três condições foram simuladas:

- a) Carga invariável, correspondente aos valores do patamar de carga de pico;
- b) Consideração de três patamares de carga, variando-se o valor das cargas lineares e mantendo fixa a carga não linear, ou seja, mantendo fixos os valores das injeções de correntes harmônicas;
- c) Consideração de três patamares de carga, variando-se equitativamente o valor das cargas lineares e não lineares, ou seja, aplicando o mesmo fator de carga para todas as cargas do sistema.

Na primeira condição, os valores originais de tensão e $DHTv$ no sistema são idênticos aos verificados no estudo de caso 1, apresentados na Tabela 8. O resultado do planejamento dos filtros também foi o mesmo, apesar de se ter adotado outra combinação de valores para as constantes de peso da função *fitness*. Neste caso, optou-se por equilibrar a redução da $DHTv$ e das perdas no sistema, adotando, para tanto, as constantes $w_1 = 1$ e $w_2 = 1$.

Nas demais condições analisadas, a variação de carga linear e não linear implica em diferentes valores de tensão e $DHTv$, que dependem da combinação de cargas lineares e não lineares em cada caso.

A redução das cargas propicia o aumento de tensão em todas as barras, já que o carregamento do sistema é reduzido, implicando em menores valores de correntes e perdas em todos os trechos dos alimentadores. Isto é ilustrado na Figura 23.

Quando se reduziram os valores das cargas lineares, mantendo-se fixos os valores das injeções de correntes harmônicas, verificou-se um aumento considerável nos índices de $DHTv$ conforme se pode observar na Figura 24. Isto se deve à redução no amortecimento das distorções harmônicas, que é proporcionado, em grande parte, pelas cargas lineares.

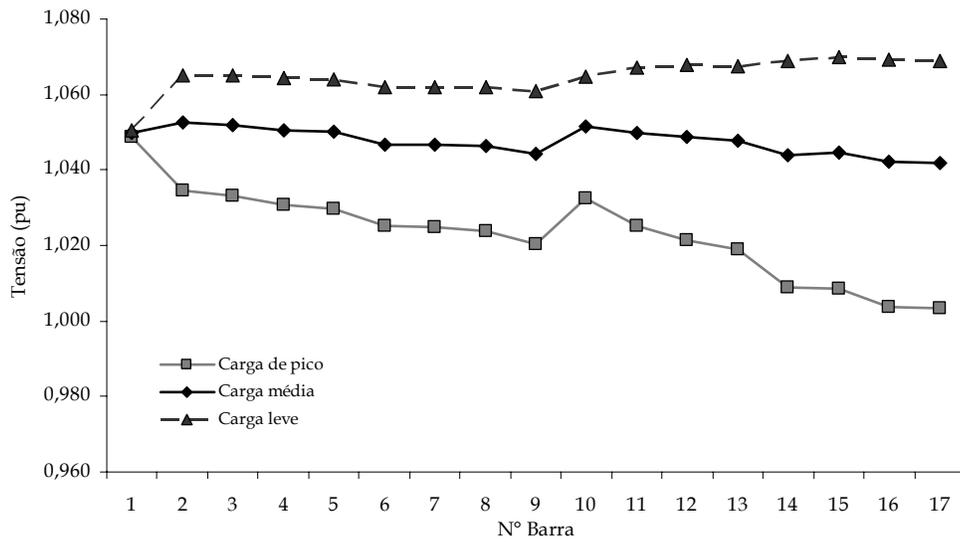


Figura 23. Tensões no sistema considerando cargas lineares variáveis e injeções de harmônicas constantes – estudo de caso 2(b).

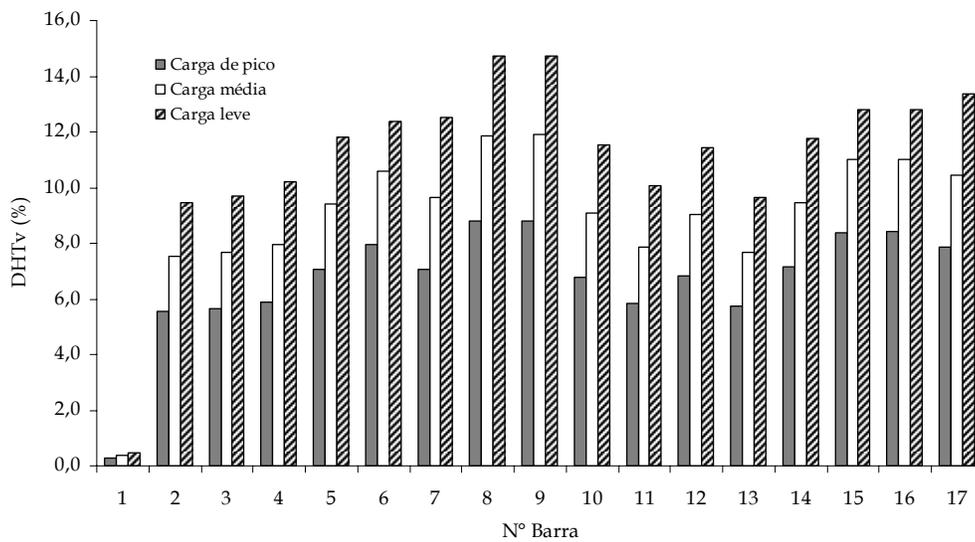


Figura 24. *DHTv* no sistema considerando cargas lineares variáveis e injeções de harmônicas constantes – estudo de caso 2(b).

O resultado do planejamento dos filtros é diferente do obtido na condição de carga fixa (caso (a)), para tornar possível a redução da *DHTv* em todos os

patamares de carga. Na Tabela 12 se apresentam os resultados obtidos no planejamento dos filtros e os parâmetros mais críticos verificados em cada caso.

Na última condição considerada, variando-se o valor das cargas lineares e não lineares equitativamente, observa-se (Figura 25) que os índices de *DHTv* diminuem com a redução das cargas, devido à combinação da redução das injeções de correntes harmônicas no sistema e do aumento da tensão na frequência fundamental. Dessa forma, o resultado do planejamento dos filtros é igual ao obtido na condição de carga fixa, pois os índices mais críticos de distorção harmônica e perdas, neste caso, são iguais ao do caso considerado para um único patamar de carga (Tabela 12).

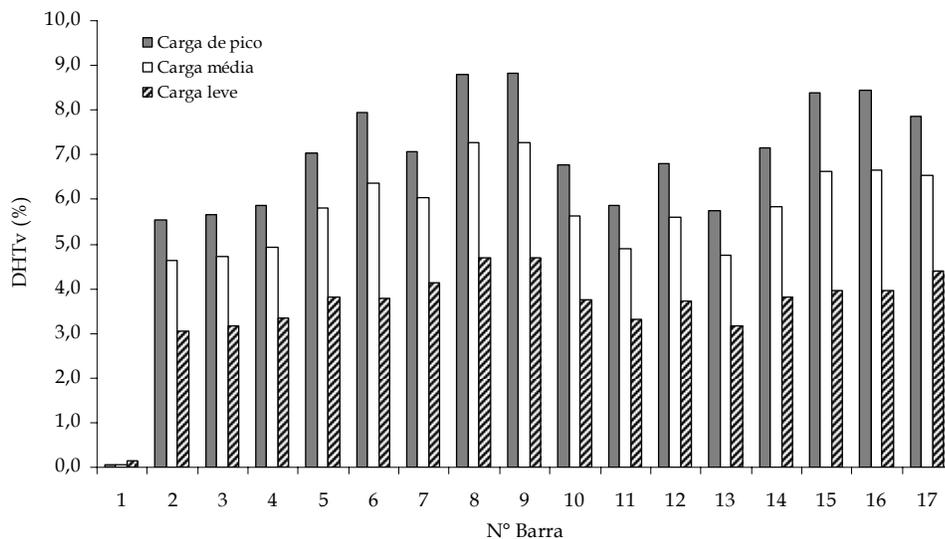


Figura 25. *DHTv* no sistema considerando a mesma variação de cargas lineares e não lineares – estudo de caso 2(c).

Os parâmetros dos filtros projetados com o uso do algoritmo microgenético em cada condição analisada são apresentados na Tabela 13.

Tabela 12. Resumo dos resultados obtidos no estudo de caso 2.

Parâmetro	<i>Cargas lineares e não lineares invariáveis</i>	<i>Cargas lineares variáveis e não lineares invariáveis</i>	<i>Cargas lineares e não lineares variáveis</i>
	(a)	(b)	(c)
Melhor Cromossomo	6-11-15-1	3-11-8-1	6-11-15-1
Max{DHTv} (%)	1,80	1,87	1,80
Max{DHTv} (%)	1,99	2,15	1,99
Max{ V } (p.u.)	1,049	1,067	1,075
Min{ V } (p.u.)	0,997	1,000	0,997
Perdas - P _i (p.u.)	0,173	0,289	0,259
Tempo médio de Processamento (s)	6,88	18,34	18,47

Tabela 13. Parâmetros dos filtros harmônicos - estudo de caso 2.

Caso	1° filtro				2° filtro			
	Barra	R (Ω)	L (mH)	C (μF)	Barra	R (Ω)	L (mH)	C (μF)
(a)	6	0,10	13,06	25,46	11	0,75	99,93	1,70
(b)	3	0,19	24,48	13,58	11	0,75	99,93	1,70
(c)	6	0,10	13,06	25,46	11	0,75	99,93	1,70

Na Figura 26 ilustra-se a redução das distorções harmônicas de tensão para o caso (c), no qual a variação das cargas lineares e não lineares é equitativa, em todos os patamares de carga. Neste caso, foram aplicados os filtros passivos com os parâmetros apresentados na Tabela 13.

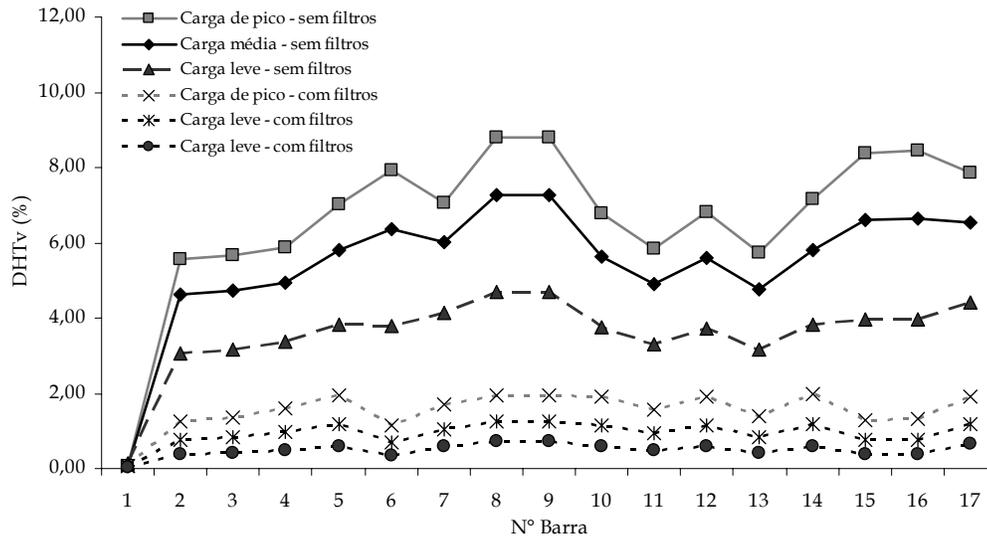


Figura 26. DHTv no sistema considerando cargas lineares e não lineares variáveis, com aplicação dos filtros sintonizados – estudo de caso 2(c).

Para efeito de comparação, aplicaram-se os filtros passivos com os parâmetros obtidos para o caso (b) à condição do sistema considerado no caso (c). Os resultados obtidos são ilustrados na Figura 27. Observa-se que os resultados na diminuição de $DHTv$ não são adequados, permanecendo valores de $DHTv$ acima do nível desejado (5,0%). Isto mostra que os resultados do planejamento são intrinsicamente dependentes da variação considerada para as cargas.

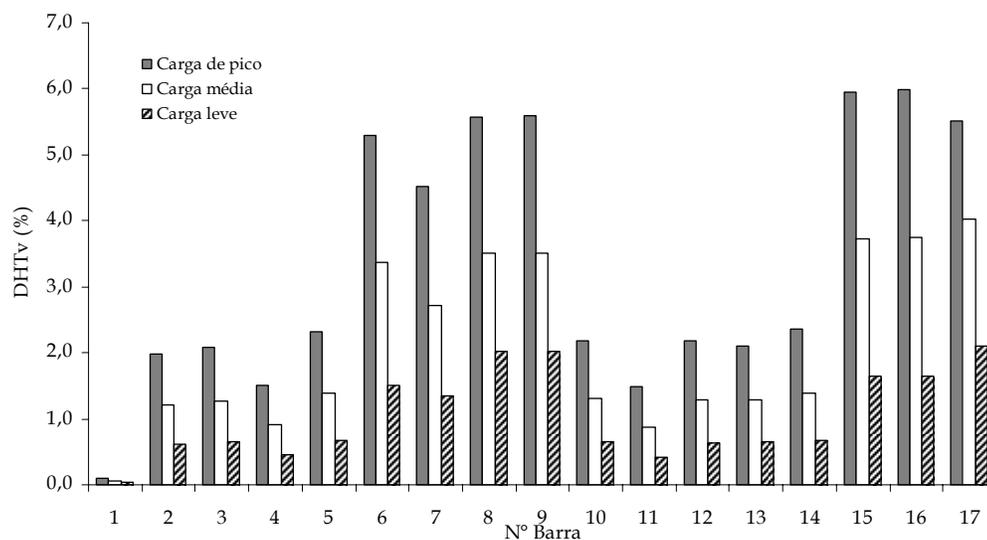


Figura 27. $DHTv$ no sistema para o caso (c), considerando a solução de filtros do caso (b) – estudo de caso 2.

6.5 Caso 3 – Variações na Modelagem das Cargas Lineares

Foram realizadas simulações com todos os modelos de cargas disponíveis no algoritmo desenvolvido – apresentados no capítulo 3. Em cada simulação, foi usado um mesmo modelo para todas as cargas do sistema, cujos parâmetros foram calculados tomando como referência apenas o patamar de carga de pico. Os resultados de $DHTv$ são ilustrados na Figura 28.

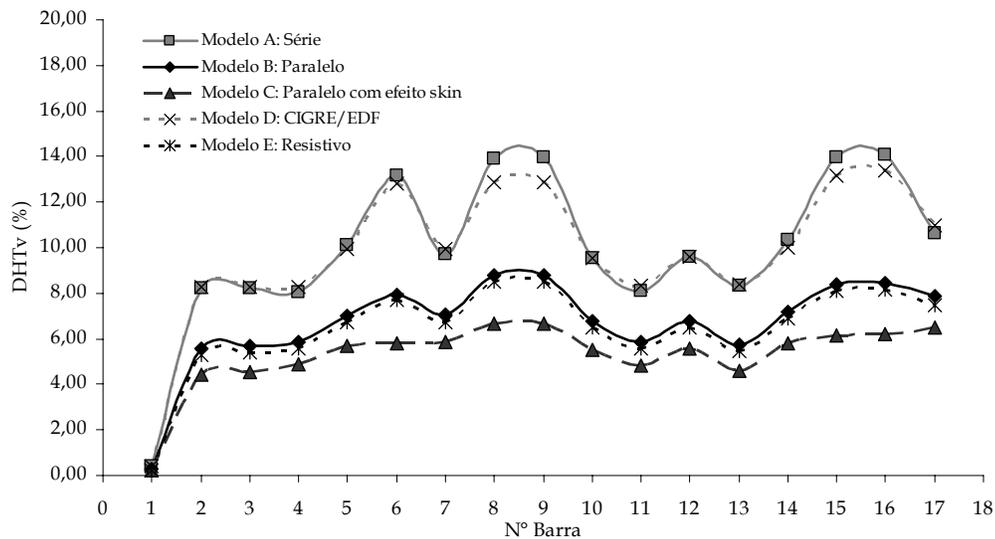


Figura 28. $DHTv$ no sistema com uso de diferentes modelos de cargas – estudo de caso 3.

Observa-se que os modelos empregados na representação da carga linear afetam significativamente os resultados do fluxo de harmônicas no sistema, pois constituem um importante elemento de amortecimento das distorções harmônicas (TASK FORCE ON HARMONIC MODELING AND SIMULATION, 2003).

Para redução das distorções harmônicas, adotou-se a estratégia de alocação dos filtros em barras distintas do sistema de distribuição e na execução do algoritmo microgenético foram adotados os mesmos parâmetros do estudo de caso anterior.

Um resumo dos resultados obtidos é apresentado na Tabela 14, onde se pode observar que a solução final do planejamento pode variar, dependendo do modelo de carga empregado nas simulações.

Tabela 14. Resumo dos resultados obtidos no estudo de caso 3.

Parâmetro	Modelo de Carga				
	A - Série	B - Paralelo	C - <i>skin</i>	D - CIGRE	E - Resistivo
Solução do A μ G	6-11-15-1	6-11-15-1	6-11-18-1	2-11-4-1	12-11-15-1
<i>fitness</i>	1,9612	1,9628	1,9639	1,9639	1,9628
<i>Perdas - P_t</i> (p.u.)	0,173	0,173	0,169	0,170	0,173
Max{ <i>DHlv</i> } (%)	1,88	1,80	1,53	1,53	1,79
Max{ <i>DHTv</i> } (%)	2,16	1,99	1,92	1,91	1,99
Max{ <i>V</i> } (p.u.)	1,049	1,049	1,049	1,049	1,049
min{ <i>V</i> } (p.u.)	0,997	0,997	1,013	1,001	0,997

6.6 Caso 4 - Variações da estratégia de alocação dos filtros

Em sistemas de distribuição, é comum utilizar a estratégia de aplicar filtros distintos em diferentes barras do sistema, substituindo os bancos de capacitores existentes por filtros harmônicos sintonizados de capacidade reativa equivalente. Diversos trabalhos abordam o problema do planejamento de filtros dessa forma (CZARNECKI e GINN, 2005; CHANG et al, 2004; DAS, 2004). No caso de sistemas industriais é mais comum utilizar um filtro composto - formado por vários ramos de filtros sintonizados, de ordens harmônicas distintas - numa determinada barra do sistema. Em geral, aquela que contém a carga não linear de maior injeção de correntes harmônicas.

Neste estudo de caso, verifica-se a influência da estratégia de alocação dos filtros harmônicos no planejamento considerando:

- a) Alocação dos filtros em barras distintas do sistema;
- b) Alocação de um filtro composto em uma única barra do sistema.

Todas as barras do sistema são consideradas na busca da solução de planejamento. Esta estratégia não é comum nos trabalhos da literatura, conforme

se observa nos trabalhos de Czarnecki e Ginn (2005), Chang et al (2004), Das (2004) e Ortmeier e Hiyama (1996), onde o espaço de busca é formado pelas barras que contém bancos de capacitores instalados. Todavia, adicionais de penalidade podem ser empregados na função de adaptação, para restringir a aplicação de filtros em determinadas barras do sistema, por observância a restrições de ordem prática, por exemplo.

Neste estudo de caso considerou-se apenas a condição de carga de pico (carga máxima), com as cargas lineares sendo modeladas por meio do modelo *RL* paralelo. Dessa forma, as tensões e *DHTv* na configuração do sistema sem filtros, são aquelas apresentadas na Tabela 8 e ilustradas na Figura 20.

Na execução do algoritmo microgenético foram adotados os mesmos parâmetros dos estudos de casos anteriores.

Um resumo dos resultados obtidos no planejamento de 3 filtros sintonizados (de 5^a, 7^a e 11^a ordem), empregando as duas estratégias de alocação dos filtros é apresentado na Tabela 15. Na Figura 29 comparam-se as *DHTv* resultantes no sistema, aplicando as soluções especificadas na Tabela 15.

Tabela 15. Resumo dos resultados obtidos no estudo de caso 4.

Parâmetro	Estratégia de Planejamento	
	Alocação dos filtros em barras distintas do sistema	Alocação de um filtro composto em uma única barra do sistema
Melhor Cromossomo	12-15-11-3-10-1	11-4-11-1
<i>Perdas - P_t</i> (p.u.)	0,170	0,167
<i>max{DHIv}</i> (%)	1,16	2,74
<i>max{DHTv}</i> (%)	1,26	2,83
<i>max{ V }</i> (p.u.)	1,049	1,049
<i>min{ V }</i> (p.u.)	1,002	1,014
<i>Tempo médio de Processamento</i> (s)	6,67	7,09

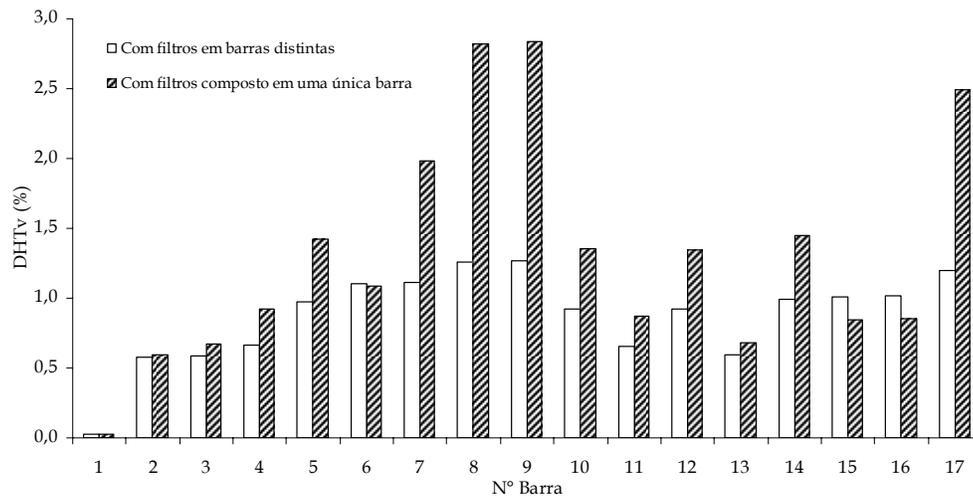


Figura 29. *DHTv* no sistema com uso de diferentes estratégias no planejamento dos filtros – estudo de caso 4.

Pode-se observar que a estratégia de utilizar filtros em barras distintas do sistema possibilita uma redução mais efetiva das distorções harmônicas de tensão em todas as barras do sistema, visto que, simultaneamente, se reduzem as possibilidades de ressonância em diversos pontos.

Na Figura 30 ilustra-se o perfil de tensão no sistema, aplicando as soluções especificadas na Tabela 15.

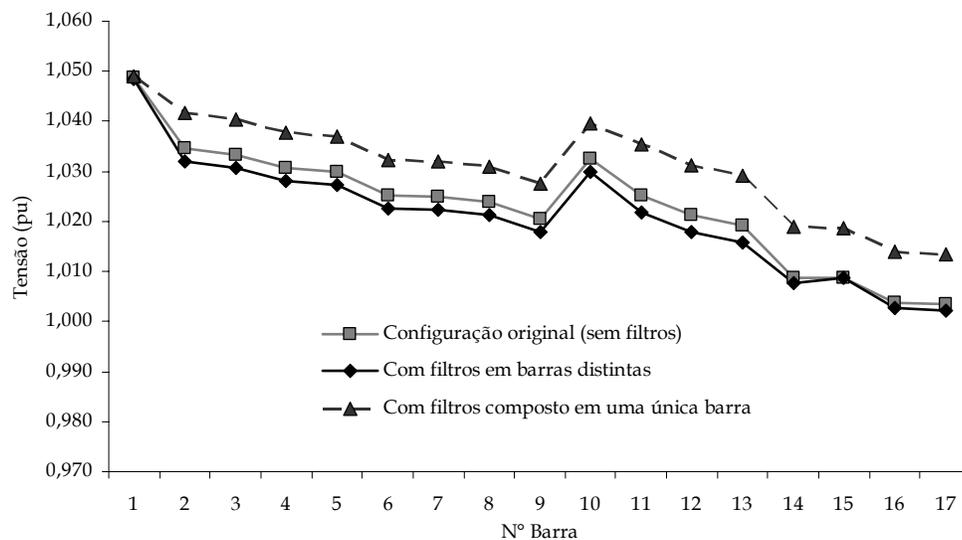


Figura 30. Tensões no sistema com uso de diferentes estratégias no planejamento dos filtros – estudo de caso 4.

6.7 Caso 5 - Avaliação de desempenho para um sistema de 232 barras

Os algoritmos implementados mostraram-se eficientes para simulações com sistemas de pequeno porte, de acordo com a avaliação realizada no primeiro estudo de caso. Contudo, um dos objetivos deste trabalho é obter um algoritmo que possa ser utilizado em sistemas de distribuição reais, que são, geralmente, bastante extensos.

Neste estudo de caso se avalia a eficiência das rotinas computacionais no estudo de um sistema com características muito próximas a dos que efetivamente se espera analisar na prática. Para tanto, se utiliza o sistema de 232 barras apresentado por Grady (2000), cujos dados foram obtidos de um sistema real (sistema de distribuição da subestação Cedar Hill, Texas). Os dados desse sistema são apresentados no Anexo A.

Foi considerada apenas a condição de carga nominal do sistema (supostamente o de carga máxima), com as cargas lineares sendo modeladas por meio do modelo *RL* paralelo.

Na execução do algoritmo microgenético foram adotados os mesmos parâmetros dos estudos de casos anteriores.

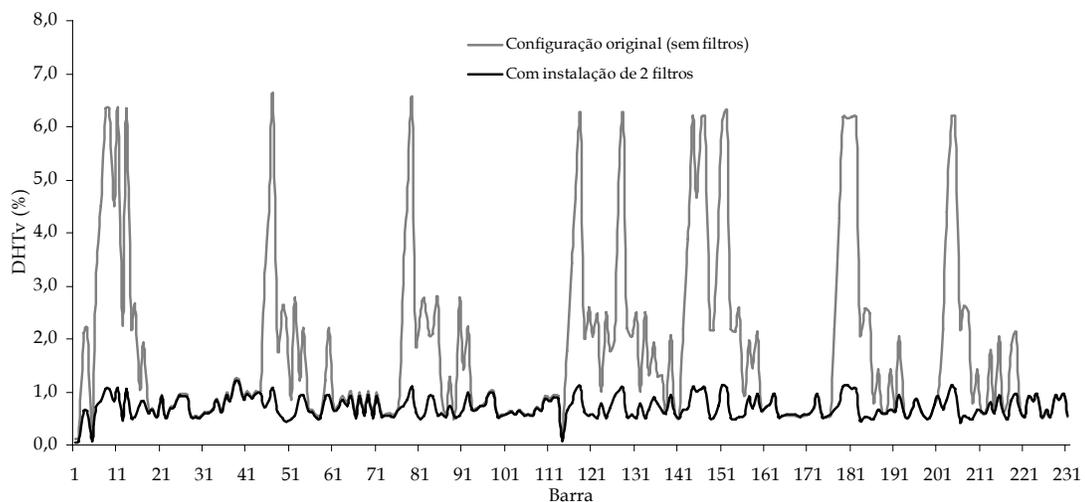
Um resumo dos resultados obtidos no planejamento de 2 filtros sintonizados (de 5ª e 7ª ordem) é apresentado na Tabela 16.

Considerando as dimensões do sistema, a natureza combinatória do problema e o tempo médio de processamento verificado (aproximadamente 11 minutos), podemos afirmar que os algoritmos apresentam eficiência suficiente para aplicação prática em estudos de planejamento de filtros harmônicos de sistemas reais.

Tabela 16. Resumo dos resultados obtidos no estudo de caso 5.

Parâmetro	Configuração original do sistema (sem filtros)	Sistema com aplicação de 2 filtros sintonizados
Melhor Cromossomo	-	54-41-24-1
$Perdas - P_t$ (p.u.)	0,1305	0,1216
$\max\{DHTv\}$ (%)	5,33	1,03
$\max\{DHTv\}$ (%)	6,56	1,19
$\max\{ V \}$ (p.u.)	1,04	1,44
$\min\{ V \}$ (p.u.)	0,92	0,96
Tempo médio de Processamento (s)	-	707,5

Na Figura 31 ilustra-se o nível de $DHTv$ em todas as barras do sistema, antes e após a aplicação da solução encontrada pelo algoritmo microgenético, especificada na Tabela 16. Embora não se possa garantir que a solução encontrada seja realmente a solução correspondente ao ótimo global (pois não se realizou a enumeração completa para este caso), observa-se que o resultado final do planejamento é bastante satisfatório.

Figura 31. $DHTv$ no sistema de 232 barras – estudo de caso 5.

Na Figura 32 ilustra-se o perfil de tensão no sistema, antes e após a aplicação da solução encontrada pelo algoritmo implementado. Verifica-se uma melhoria significativa no perfil de tensão, que se mantém dentro da faixa aceitável para sistemas de distribuição ($\pm 5\%$). A redução de perdas é de, aproximadamente, 6,8%.

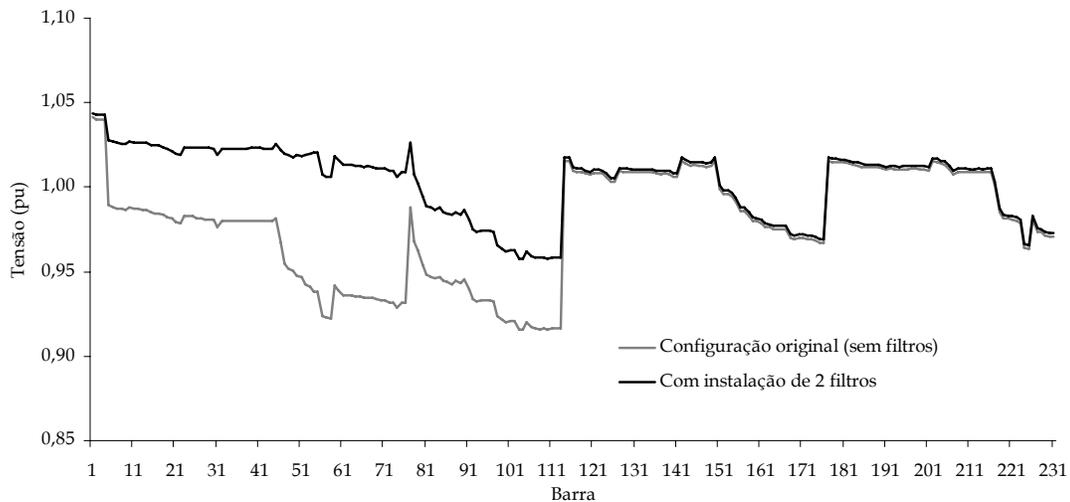


Figura 32. Perfil de tensão no sistema de 232 barras – estudo de caso 5.

Capítulo 7

Considerações Finais

7.1 Conclusões

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um algoritmo para realizar o planejamento ótimo de múltiplos filtros harmônicos passivos em sistemas de distribuição.

O algoritmo de planejamento é dito ótimo, pois foi desenvolvido para fornecer a localização e os parâmetros de filtros harmônicos sintonizados que proporcionam a máxima redução das distorções harmônicas totais das tensões em todas as barras do sistema, atendendo, simultaneamente a diversas restrições.

Algoritmos evolutivos foram aplicados para solucionar o problema de otimização apresentado, que é de natureza combinatória, pois os valores de capacidade reativa e de pontos de instalação dos filtros foram tratados como variáveis discretas. Foi verificado que os algoritmos genéticos e os algoritmos microgenéticos se adequaram muito bem ao problema, como ferramentas heurísticas de otimização combinatória.

Apesar de algumas simplificações adotadas, o método proposto tem requisitos suficientes para ser aplicado a qualquer sistema radial de distribuição em que as características das cargas não lineares sejam conhecidas a priori.

As contribuições deste trabalho são:

- Aplicação de algoritmos evolutivos com eficiência computacional suficiente para aplicação a sistemas reais de distribuição: foi implementado um algoritmo microgenético, que se mostrou eficiente na solução do problema de otimização, apresentando soluções factíveis para o planejamento de filtros harmônicos passivos em sistemas de distribuição de grandes dimensões, com tempo de processamento satisfatório.
- Concepção de uma estrutura cromossômica baseada em codificação binária compacta e aplicação de uma função *fitness* que permite tratar o problema como multiobjetivo, pois procura soluções que satisfazem ao menos dois atributos: a minimização das distorções harmônicas de tensão e das perdas, e também possibilita incorporar restrições de ordem prática. A função *fitness* elaborada define uma relação de compromisso entre a redução das distorções harmônicas de tensão e das perdas no sistema, que pode ser ajustada segundo a estratégia empregada no planejamento dos filtros.
- Aplicação de um algoritmo de fluxo de harmônicas e de um fluxo de potências específico para sistemas radiais de distribuição, que utilizam modelos compatíveis com dados normalmente disponíveis na prática. A utilização desses algoritmos contribuiu para a eficiência computacional global do método proposto, pois permitiram determinar com bastante eficiência os índices de adaptação dos indivíduos da população, a cada nova geração. Tendo sido verificado, nos casos analisados neste trabalho, tempos de processamento inferiores aos apresentados em trabalhos da literatura que empregam metodologias similares.
- Incorporação de diferentes modelos de cargas lineares: foi verificado que o modelo empregado na representação das cargas lineares afetam os índices resultantes de DHT_v do sistema. Dessa forma, foram incorporados diversos modelos de cargas lineares ao algoritmo do fluxo

de harmônicas, que podem ser empregados de acordo com o conhecimento da composição das cargas em cada barra do sistema.

- Consideração das variações de carga lineares e não lineares: foi verificado que a variação das cargas lineares e não lineares propiciam uma variação considerável nos índices de DHT_v do sistema. Isto se deve à redução no amortecimento das distorções harmônicas, proporcionada, em grande parte, pelas cargas lineares. Para caracterizar as variações de carga utilizam-se as informações das curvas de carga dos alimentadores, levantadas na subestação, e as medições efetuadas para caracterização das cargas não lineares.
- Aplicação de diferentes estratégias no planejamento dos filtros passivos: Duas estratégias de planejamento foram implementadas: alocação dos filtros em barras distintas do sistema, ou alocação de um filtro composto em uma única barra do sistema. Em ambos os casos, foi considerada a possibilidade de instalação dos filtros em qualquer uma das barras do sistema, ajustando-se automaticamente a compensação reativa local para prover a minimização das distorções harmônicas de tensão, mas mantendo-se o atendimento às condições normais de operação do sistema.

7.2 Limitações do trabalho

Os algoritmos de fluxo de potências e de harmônicas desenvolvidos neste trabalho só se aplicam a sistemas equilibrados, pois não foi implementada a representação trifásica da rede. Contudo, os algoritmos desenvolvidos podem ser modificados para atender esse requisito.

O algoritmo de fluxo de potência implementado é específico para simulação de redes radiais, embora a metodologia de planejamento desenvolvida seja inteiramente aplicável a alimentadores malhados.

Não foram considerados outros tipos de filtros passivos que os do tipo sintonizado, embora a metodologia apresentada seja perfeitamente aplicável ao projeto de filtros amortecido de 2ª ordem e filtros amortecidos do tipo C, por exemplo. Contudo, em todos os casos analisados, a aplicação de filtros sintonizados apenas, foi suficiente para obtenção de resultados satisfatórios.

7.3 Propostas para Trabalhos Futuros

Com o intuito de procurar melhorar o desempenho alcançado com o algoritmo proposto, apresentam-se algumas sugestões que podem ser vistas como idéias para dar prosseguimento a esta linha de pesquisa:

- Implementar modificações no algoritmo apresentado para dirimir as limitações apontadas neste trabalho;
- Aplicar um método de otimização combinatória multiobjetivo, com representação probabilística das cargas lineares e não lineares;
- Desenvolver uma metodologia para o planejamento integrado de filtros harmônicos, bancos de capacitores e reguladores de tensão;
- Reavaliar o planejamento dos filtros com base em outras funções de adaptação, como, por exemplo, o retorno econômico do investimento realizado na redução dos distúrbios (pay-back dos filtros).

Outra linha de pesquisa é investigar a aplicação simultânea de filtros ativos e passivos.

Referências Bibliográficas

- ALVES, H. N. *Algoritmos Microgenéticos e Lógica Fuzzy Aplicados ao Controle de Bancos de Capacitores em Redes de Distribuição*, Exame de Qualificação (Doutorado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica), DEE/CCT/UFPG, Campina Grande, Paraíba, Brasil, Novembro 2003.
- APOLÔNIO, R., OLIVEIRA, J. C., VASCONCELOS, A. B., *Three-Phase Electromagnetic Filter for Zero Sequence Harmonics*, In: Proceedings of 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Lake Placid, New York, September 2004.
- ARRILLAGA, J., SMITH, B. C., WATSON, N. R., WOOD, A. R. *Power System Harmonic Analysis*, New York :John Wiley & Sons, 1997.
- AZIZ, M. M. A, LOGGINI, M. *Filters and Protection Reactance for Distortion Compensation in Low Voltage Plants*, IEEE Transactions on Power Systems, pp. 1488-1496, 1988.
- BERIZZI, A., BOVO, C. *The Use of Genetic Algorithms for the Location and the Sizing of Passive Filters*, In: Proceedings of 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power, v. 1, pp. 19-25, October 2000.
- CHANG, G. W., CHU, S. Y., WANG, H. L. *A New Approach for Placement of Single-Tuned Passive Harmonic Filters in a Power System*, In: Proceedings of the 2002 IEEE PES Winter Meeting, New York, v. 2, pp. 814-817, July 2002.
- _____, CHU, S. Y., WANG, H. L. *Sensitivity-Based Approach for Passive Harmonic Filter Planning in a Power System*, In: Proceedings of the 2002 IEEE PES Winter Meeting, New York, v. 2, pp. 937-940, July 2002.

- _____, WANG, H. L., CHU, S. Y. *Strategic Placement and Sizing of Passive Filters in a Power System for Controlling Voltage Distortion*, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 19, n. 13, pp. 1204-1211, July 2004.
- CHANG, T. T., CHANG, H. C. *Application of Differential Evolution to Passive Shunt Harmonic Filter Planning*, In: Proceedings of 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Athens, Greece, v. 1, pp. 149-153, October 1998.
- CHANG, Ying-Pin, WU, Chi-Jui. *Optimal Multiobjective Planning of Large-Scale Passive Harmonic Filters Using Hybrid Differential Evolution Method Considering Parameter and Loading Uncertainty*, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 20, n. 1, pp. 408-416, January 2005.
- CHOU, C. J., LIU, C. W., LEE, J. Y., LEE, K. D., *Optimal Planning of Large Passive-Harmonic-Filters Set at High Voltage Level*, IEEE Transactions on Power Systems, v. 15, n. 1, pp. 433-441, February 2000.
- CHU, R. F., WANG, J. C., CHIANG, H. D. *Strategic Planning of LC Compensators in Nonsinusoidal Distribution Systems*, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 9, n. 3, pp. 1558-1563, July 1994.
- CHUNG, T. S., LEUNG, H. C. *A Genetic Algorithm Approach in Optimal Capacitor Selection with Harmonic Distortion Considerations*, Electrical Power and Energy Systems, v. 21, pp. 561-596, 1999.
- CZARNECKI, L., GINN, H. *The Effect of the Design Method on Efficiency of Resonant Harmonic Filters*, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 20, n. 1, pp. 286-291, January 2005.
- CZARNECKI, L., GINN, H. *Effects of Damping on the Performance of Resonant Harmonic Filters*, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 19, n. 2, pp. 846-853, April 2004.
- DAS, J. C. *Passive Filters – Potentialities and Limitations*, IEEE Transactions on Industry Applications, v. 40, n. 3, pp. 232-241, January/February 2004.

- DAS, D., KOTHARI, D. P., KALAM, A. *Simple and efficient method for load flow solution of radial distributions networks*, Electrical Power & Energy Systems, v. 17, pp. 335-346, 1995.
- DOMIJAN, A., HEYDT, G.T., MELIOPOULOS, A.P.S., VENKATA, S.S., WEST, S., *Directions of Research on Electric Power Quality*, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 8, n. 1, pp. 429-436, January 1993.
- DUGAN, R. C., KO, C. D. *Analyzing and Controlling Harmonic Distortion in Distribution Feeders*, In: International Conference on Harmonics in Power Systems, Worcester Polytechnic Institute, pp. 22-23, October 1984.
- DUGAN, R. C., MCGRANAGHAM, F., BEATY, H. W., *Electric power system quality*: McGraw-Hill, 1996.
- EMANUEL, A. E., ORR, J. A., CYGANSKI, D., GULACHENSKI, E. M. *A Survey of Harmonic Voltages and Currents at Customer's Bus*, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 8, n. 1, pp. 411-421, January 1993.
- FERREIRA, H. A., SOUZA, B. A., ALVES, H. N. *Optimal Capacitor Allocation in Electrical Distribution Systems Using a Genetic Algorithm*, In: Proceedings of the IEEE/PES T&D 2002 Latin America, São Paulo, Brazil, March 2002.
- GALVÃO, C. O., VALENÇA, M. J. S. *Sistemas Inteligentes: aplicações a recursos hídricos e sistemas ambientais*. Porto Alegre: Universidade/UFRGS/ABRH, 1999.
- GOLDBERG, D. E. "*Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*". Addison-Wesley, 1989.
- GONZALEZ, D. A., MCCALL, J. C. *Design of Filters to Reduce Harmonic Distortion in Industrial Power Systems*, IEEE Transactions on Industry Applications, v. IA-23, n. 3, pp. 504-511, May/June 1987.
- GRADY, W. M., SAMOTYJ, M. J., NOYOLA, A. H. *The Application of Network Objective Functions for Actively Minimizing the Impact of Voltage Harmonics in Power Systems*, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 7, n. 3, July 1992.

- GRADY, M. *PCFLO Version 5.2 User Manual*, Texas: University of Texas at Austin, July 1998. Disponível em: <http://www.ece.utexas.edu/~grady/>
- HARTANA, R. K., RICHARDS, G. G. *Optimum Filter Design for Distribution Feeders with Multiple Harmonic Sources*, *Electric Power Systems Research*, v. 23, pp. 103-113, 1992.
- HOLLAND, J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The University of Michigan Press, 1st ed., 1975.
- HONG, Y. Y., HUANG, W. F. *Interactive Multiobjective Passive Filter Planning with Fuzzy Parameters in Distribution Systems Using Genetic Algorithms*, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 18, n. 3, July 2003.
- HSU, C. T., Yan, Y. H., Chen, C. S., Her, S. L., *Optimal Reactive Power Planning for Distribution Systems with Nonlinear Loads*, In: *Proceedings of Conference on Computer, Communication, Control and Power Engineering – IEEE TENCON'93*, v. 5, pp. 330-333, October 1993.
- IEEE STANDARD 519, “*IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*”, New York: IEEE Press, 1992.
- IEEE TASK FORCE ON THE EFFECTS OF HARMONICS ON EQUIPMENT, *Effects of Harmonics on Equipment*, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 8, n. 2, pp. 672-680, April 1993.
- IEEE TASK FORCE ON HARMONICS AND SIMULATION, *Modeling Devices With Nonlinear Voltage-Current Characteristics for Harmonics Studies*, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 4, pp. 1802-1811, October 2004.
- IEEE TASK FORCE ON HARMONIC MODELING AND SIMULATION, *Impact of Aggregate Linear Load Modeling on Harmonic Analysis: A Comparison of Common Practice and Analytical Models*, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 18, n. 2, pp. 625-630, April 2003.

- IEEE WORKING GROUP ON POWER SYSTEM HARMONICS, *Power System Harmonics: An Overview*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-102, pp. 2455-2486, August 1983.
- KAWANN, C., EMANUEL, A. E. *Passive Shunt Harmonic Filters for Low and Medium Voltage: A Cost Comparison Study*, IEEE Transactions on Power Systems, v. 11, n. 4, pp. 1825-1831, November 1996.
- KRISHAKUMAR, K. *Micro-Genetic Algorithms for Stationary and non Stationary Function Optimization*, SPIE Intelligent Control and Adaptive System, 1196, Philadelphia, pp. 289-296, 1989.
- LIN, K. P., LIN, M. H., LIN, T. P. *An Advanced Computer Code for Single-Tuned Harmonic Filter Design*, IEEE Transactions on Industry Applications, v. 34, n. 4, pp. 640-648, July/August 1998
- MAKRAM, E. B., SUBRAMANIAM, E. V., GIRGIS, A. A., CATOE JR, R. C. *Harmonic Filter Design Using Actual Recorded Data*, IEEE Transactions on Industry Applications, v. 29, n. 6, pp. 1176-1183, November/December 1993.
- MONTANARI, G. C., LOGGINI, M. *Filters and Protection Reactance for Distortion Compensation in Low Voltage Plants*, IEEE Transactions on Power Systems, pp. 1488-1496, 1988.
- MOURA, C. C., TOSTES, M. E. L., SANTOS, E. P., OLIVEIRA, R. C. L., BRANCO, T. M., BEZERRA, U. H. "Determination of the R-L-C Parameters of a Passive Harmonic Filter Using Genetic Algorithms", *Proceedings of the 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.
- NEVES, W. L. A., DOMMEL, H. W., XU, W. *Practical Distribution Transformer Models for Harmonic Studies*, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 10, n. 2, pp. 906-912, April 1995.
- NGUYEN, T. T. *Optimal harmonic filter design procedure*, Electrical Power Systems Research, v. 23, pp. 217-226, 1992.

- ORTMEYER, T. H., HIYAMA, T. *Distribution System Harmonic Filter Planning*, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 11, n. 4, pp. 2005-2012, October 1996.
- PAMPLONA, F. M. P., SOUZA, B. A. *Algoritmos genéticos aplicados ao projeto de filtros harmônicos passivos em sistemas elétricos de distribuição*, In: Anais do 5º Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica. Aracaju:NEPEN, v. 1, pp. 79-84, Agosto 2003.
- RIBEIRO, P.F. *Guidelines on Distribution System and Load Representation for Harmonic Studies*. In: Proceedings of 5th International Conference on Harmonics in Power Systems, pp. 272 – 280, September 1992.
- _____, *Tutorial on Harmonics Modeling and Simulation*. In: IEEE PES winter meeting, 1998.
- RICHARDS, G. G., KLINKHACHORR, P., TAN, O. J., HARTANA, R. K. *Optimal LC Compensators for Nonlinear Loads with Uncertain Nonsinusoidal Source and Load Characteristics*, IEEE Transactions on Power Systems, v. 4, n. 1, pp. 30-36, February 1993.
- _____, YANG, H. *Distribution System Harmonic Worst Case Design Using a Genetic Algorithm*, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 8, n. 3, July 1993.
- SOUZA, B. A., ALVES, H. N., FERREIRA, H. A. *Microgenetic Algorithms and Fuzzy Logic Applied to the Optimal Placement of Capacitor Banks in Distribution Networks*, IEEE Transactions on Power Systems, v. 19, n. 2, pp. 942-947, May 2004.
- _____, ALVES, H. N., FERREIRA, H. A., CAVALCANTI, L. F. *Banks of Automatic capacitors in Electrical distribution Systems: A Genetic Algorithm of Control*, Congreso Internacional de Distribucion Electrica, Buenos Aires, Argentina, Dezembro 2002.
- TANG, Y., MAHMOUD, A. A. *Evaluation and Reduction of Harmonic Distortion in Power Systems*, Electric Power Systems Research, v. 17, pp. 41-48, 1989.

TASK FORCE ON HARMONICS MODELING AND SIMULATION, *Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks – Part I: Concepts, Models, and Simulation Techniques*, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 11, n. 1, pp 452-465, January 1996.

_____, *Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks – Part II: Sample Systems and Examples*, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 11, n. 1, pp 466-474, January 1996.

_____, *Test Systems for Harmonics Modeling and Simulation*, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 14, n. 2, pp. 579-587, April 1999.

_____, *Impact of Aggregate Linear Load Modeling on Harmonic Analysis: A Comparison of Common Practice and Analytical Models*, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 18, n. 2, pp. 625-630, April 2003.

TOSTES, M. E., BEZERRA, U. H., GARCEZ, J. N., TUPIASSU, A. A., SENA, A. C. A. *Development of Experimental Models for harmonic Representation of Low Voltage Customers*, In: IEEE Power Tech Proceedings, Portugal, September 2001.

YAN, Y. H., CHEN, C. S., MOO, C. S., HSU, C. T. *Harmonic Analysis for Industrial Customers*, IEEE Transactions on Industry Applications, v. 30, n. 2, March/April 1994.

YANG, H., RICHARDS, G. G. *Optimum Distribution System Harmonic Filter Design Using a Genetic Algorithm*, Electric Power System Research, v. 30, pp. 263-267, 1994

ZHAO, Y., DENG, H. G., LI, J., XIA, D. *Optimal Planning of Harmonic Filters on Distribution Systems by Chance Constrained Programming*, Electric Power System Research, v. 68, pp. 149-156, 2004

Apêndice A

Tabela 17. Dados de linha do sistema teste de 232 barras.

N° do Trecho	Da barra	Para Barra	R (Ω)	X_L (Ω)	N° do Trecho	Da barra	Para Barra	R (Ω)	X_L (Ω)
1	1005	1004	0,009827	0,068311	40	35	36	0,113121	0,084746
2	1004	1003	0,003599	0,024681	41	35	37	0,107218	0,051609
3	1003	1001	0,019406	0,113083	42	35	38	0,122643	0,091983
4	1003	1002	0,006437	0,045477	43	38	39	0,412112	0,135593
5	1003	1	0,067416	1,317845	44	39	40	0,07351	0,024186
6	1	2	0,070844	0,197867	45	1	50	0,085508	0,238812
7	2	3	0,180918	0,130451	46	50	51	0,149115	0,416302
8	3	4	0,348886	0,251762	47	51	52	0,129499	0,38107
9	3	5	0,542564	0,391545	48	52	53	0,024376	0,071986
10	2	6	0,014664	0,040945	49	53	54	0,174443	0,125881
11	6	7	0,102647	0,286612	50	53	55	0,058656	0,172539
12	7	8	0,024376	0,068178	51	55	56	0,853552	0,281089
13	7	9	0,046467	0,12969	52	55	57	0,078271	0,218435
14	9	10	0,026852	0,075033	53	57	58	0,068178	0,084174
15	10	11	0,122262	0,341268	54	58	59	0,180918	0,135593
16	11	12	0,058656	0,172539	55	59	60	0,382594	0,125881
17	12	13	0,024376	0,068178	56	59	61	1,007808	0,755856
18	13	14	0,063607	0,17749	57	61	62	0,412112	0,135593
19	14	15	0,206627	0,149115	58	61	63	0,800991	0,600838
20	15	16	0,310036	0,223767	59	57	64	0,026852	0,075033
21	16	17	3,061133	1,007808	60	64	65	0,070844	0,208532
22	17	18	1,446963	1,085318	61	65	66	0,073319	0,215769
23	14	19	0,102647	0,286612	62	66	67	0,007237	0,02152
24	19	20	0,012188	0,034089	63	67	68	0,046467	0,136545
25	20	21	0,046467	0,12969	64	67	69	0,024376	0,071986
26	20	22	0,219196	1,773758	65	69	70	0,026852	0,079033
27	22	23	0,025329	0,109313	66	70	71	0,206627	0,155018
28	23	24	0,011617	0,034089	67	70	72	0,014664	0,04323
29	24	25	0,017711	0,052181	68	72	73	0,29442	0,096934
30	25	26	0,007998	0,023424	69	69	74	0,063607	0,187012
31	26	27	3,914685	1,288707	70	74	75	0,235384	0,077509
32	26	28	0,004951	0,014473	71	74	76	0,012188	0,035993
33	28	29	0,058084	0,043611	72	76	77	0,058656	0,172539
34	29	30	0,006475	0,004761	73	77	78	0,012188	0,035993
35	28	31	0,00857	0,025138	74	78	79	1,03028	0,339174
36	31	32	0,004951	0,014473	75	78	80	0,03904	0,115026
37	31	33	0,096934	0,072748	76	80	81	0,03904	0,109122
38	33	34	0,058846	0,019425	77	1	100	0,019615	0,057513
39	33	35	0,035612	0,026662	78	100	101	0,261474	0,769378

Continuação dos dados de linha do sistema teste de 232 barras.

N° do Trecho	Da barra	Para Barra	R (Ω)	X_L (Ω)	N° do Trecho	Da barra	Para Barra	R (Ω)	X_L (Ω)
79	101	102	0,078271	0,218435	118	153	154	0,004571	0,006475
80	102	103	0,124548	0,348124	119	154	155	0,245477	0,184155
81	103	104	0,097696	0,273091	120	155	156	0,413445	0,310036
82	104	105	0,149115	0,416302	121	154	157	0,077509	0,058084
83	105	106	1,560084	0,513617	122	157	158	0,103409	0,077509
84	105	107	0,051228	0,143401	123	158	159	0,142068	0,106646
85	104	108	0,241859	0,711865	124	157	160	0,245477	0,184155
86	108	109	0,235384	0,077509	125	160	161	0,439345	0,329461
87	109	110	0,235384	0,077509	126	161	162	0,206627	0,155018
88	108	111	0,073319	0,215769	127	152	163	0,003047	0,01295
89	111	112	0,175967	0,517806	128	163	164	0,021139	0,091221
90	104	113	0,090459	0,252523	129	164	165	0,164731	0,123596
91	113	114	0,195582	0,545991	130	164	166	0,006094	0,02609
92	114	115	0,195582	0,545991	131	166	167	0,0259	0,019425
93	115	116	0,794706	0,261665	132	167	168	0,232527	0,174443
94	115	117	0,073319	0,204723	133	166	169	0,003047	0,01295
95	117	118	0,012188	0,035993	134	169	170	0,03904	0,018854
96	118	119	0,012188	0,035993	135	170	171	0,067797	0,050847
97	119	120	0,117311	0,345077	136	169	172	0,019996	0,08646
98	119	121	0,930109	0,697582	137	172	173	0,013902	0,060369
99	121	122	0,142068	0,106646	138	173	174	0,011617	0,034089
100	122	123	0,144163	0,402781	139	173	175	0,007998	0,023424
101	123	124	0,019615	0,054656	140	175	176	0,122262	0,341268
102	124	125	0,053704	0,150067	141	176	177	0,129118	0,093316
103	123	126	1,111027	0,801943	142	150	200	0,006094	0,00857
104	126	127	0,06475	0,014664	143	200	201	0,058656	0,163778
105	122	128	0,310036	0,232527	144	201	202	0,706342	0,232527
106	128	129	0,930109	0,697582	145	201	203	0,235384	0,077509
107	129	130	0,142068	0,106646	146	203	204	0,470958	0,155018
108	130	131	0,168539	0,470958	147	203	205	0,14721	0,048372
109	130	132	0,03885	0,029137	148	205	206	0,647496	0,213102
110	132	133	0,452105	0,326414	149	205	207	0,29442	0,096934
111	132	134	0,374595	0,281089	150	200	208	0,058656	0,163778
112	134	135	0,097696	0,273091	151	208	209	1,175586	0,881737
113	135	136	0,015426	0,021329	152	209	210	0,180918	0,135593
114	1004	150	0,023043	0,732051	153	210	211	0,684822	0,513617
115	150	151	0,001904	0,002666	154	210	212	0,103409	0,077509
116	151	152	0,054466	0,234813	155	212	213	0,180918	0,135593
117	152	153	0,00857	0,010474	156	213	214	0,348886	0,261665

Continuação dos dados de linha do sistema teste de 232 barras.

N° do Trecho	Da barra	Para Barra	R (Ω)	X_L (Ω)	N° do Trecho	Da barra	Para Barra	R (Ω)	X_L (Ω)
157	214	215	0,794706	0,261665	196	268	269	0,024376	0,068178
158	214	216	0,206627	0,155018	197	265	270	0,001904	0,005142
159	216	217	0,180918	0,135593	198	270	271	0,022091	0,028756
160	217	218	0,054656	0,067225	199	270	272	0,016568	0,046086
161	218	219	0,077509	0,058084	200	272	273	0,013521	0,037517
162	219	220	0,129118	0,096934	201	273	274	0,063607	0,17749
163	220	221	0,103409	0,077509	202	150	300	0,006094	0,00857
164	221	222	0,129118	0,096934	203	300	301	0,009712	0,027233
165	222	223	0,054656	0,067225	204	301	302	0,011046	0,030661
166	223	224	0,323748	0,106646	205	302	303	0,004951	0,014473
167	223	225	0,490954	0,368121	206	303	304	0,032946	0,097124
168	222	226	1,648258	0,542564	207	304	305	0,413445	0,298419
169	226	227	1,736622	0,571701	208	304	306	0,026281	0,077319
170	226	228	0,088364	0,029137	209	306	307	0,031232	0,091602
171	228	229	0,054656	0,067225	210	307	308	0,020758	0,058084
172	229	230	0,794706	0,261665	211	308	309	0,083984	0,06056
173	220	231	0,749381	0,54085	212	308	310	0,014664	0,040945
174	231	232	0,478004	0,358599	213	307	311	0,040945	0,120358
175	231	233	0,478004	0,358599	214	311	312	0,155018	0,111979
176	233	234	0,016568	0,046086	215	311	313	0,009712	0,028756
177	150	250	0,006094	0,00857	216	313	314	0,014664	0,04323
178	250	251	0,014664	0,040945	217	306	315	0,273091	0,353457
179	251	252	0,006094	0,01714	218	315	316	0,655685	0,491716
180	251	253	0,004951	0,013712	219	316	317	0,142068	0,106646
181	253	254	0,117692	0,03885	220	317	318	0,064559	0,048372
182	253	255	0,015807	0,044373	221	318	319	0,03885	0,029137
183	255	256	0,011617	0,032375	222	319	320	0,658922	0,494192
184	256	257	0,176538	0,058084	223	319	321	0,348886	0,261665
185	256	258	0,023234	0,06475	224	321	322	2,312513	1,734528
186	258	259	0,007998	0,022091	225	322	323	0,077509	0,058084
187	259	260	0,001904	0,005142	226	317	324	0,064559	0,048372
188	260	261	0,0259	0,018663	227	324	325	0,620073	0,465054
189	260	262	0,022091	0,028756	228	325	326	1,089126	0,358599
190	259	263	0,012759	0,037707	229	325	327	1,072368	0,804228
191	263	264	0,053704	0,158256	230	327	328	0,167968	0,125881
192	263	265	0,003047	0,008951	231	328	329	0,382594	0,125881
193	265	266	0,044373	0,057513	—	—	—	—	—
194	266	267	0,155018	0,116359	—	—	—	—	—
195	266	268	0,022091	0,028756	—	—	—	—	—

Tabela 18. Dados de barra do sistema teste de 232 barras.

N° da barra	\bar{P} (MW)	\bar{Q} (Mvar)	Q_{sh} (Mvar)	N° da barra	\bar{P} (MW)	\bar{Q} (Mvar)	Q_{sh} (Mvar)
1004	0,0000	0,0000	0,0000	36	0,0000	0,0000	0,0000
1003	0,0000	0,0000	0,0000	37	0,0000	0,0000	0,0000
1001	0,0000	0,0000	0,0000	38	0,0000	0,0000	0,0000
1002	0,0000	0,0000	0,0000	39	0,0085	0,0053	0,0000
1	0,0000	0,0000	0,0000	40	0,0085	0,0053	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	50	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,2338	0,1449	0,0000	51	0,0425	0,0263	0,0000
4	0,0850	0,0527	0,0000	52	0,0425	0,0263	0,6000
5	0,1488	0,0922	0,0000	53	0,8500	0,5268	0,0000
6	0,1275	0,0790	0,0000	54	0,8500	0,5268	0,0000
7	0,1275	0,0790	0,0000	55	0,0850	0,0527	0,0000
8	0,0000	0,0000	0,0000	56	0,0850	0,0527	0,0000
9	0,0000	0,0000	0,0000	57	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,2125	0,1317	0,6000	58	0,0425	0,0263	0,0000
11	0,2125	0,1317	0,0000	59	0,2550	0,1580	0,0000
12	0,0000	0,0000	0,0000	60	0,0425	0,0263	0,0000
13	0,0425	0,0263	0,6000	61	0,7650	0,4741	0,0000
14	0,3400	0,2107	0,0000	62	0,3825	0,2371	0,0000
15	0,1828	0,1133	0,0000	63	0,2125	0,1317	0,0000
16	0,2338	0,1449	0,0000	64	0,1275	0,0790	0,0000
17	0,0723	0,0448	0,0000	65	0,2125	0,1317	0,6000
18	0,0213	0,0132	0,0000	66	0,0850	0,0527	0,0000
19	0,2975	0,1844	0,6000	67	0,1700	0,1054	0,0000
20	0,0000	0,0000	0,0000	68	0,1700	0,1054	0,0000
21	0,0000	0,0000	0,0000	69	0,1063	0,0659	0,0000
22	0,0000	0,0000	0,0000	70	0,1063	0,0659	0,0000
23	0,0425	0,0263	0,0000	71	0,0850	0,0527	0,0000
24	0,1275	0,0790	0,9000	72	0,0638	0,0395	0,0000
25	0,0850	0,0527	0,0000	73	0,0638	0,0395	0,0000
26	0,1700	0,1054	0,0000	74	0,2550	0,1580	0,0000
27	0,1275	0,0790	0,0000	75	0,1700	0,1054	0,0000
28	0,4250	0,2634	0,0000	76	0,2125	0,1317	0,6000
29	0,3825	0,2371	0,0000	77	0,2125	0,1317	0,0000
30	0,0000	0,0000	0,0000	78	0,4250	0,2634	0,0000
31	0,0000	0,0000	0,0000	79	0,3825	0,2371	0,0000
32	0,0000	0,0000	0,0000	80	0,1275	0,0790	0,0000
33	0,0000	0,0000	0,0000	81	0,0850	0,0527	0,0000
34	0,0000	0,0000	0,0000	100	0,0298	0,0184	0,6000
35	0,0000	0,0000	0,0000	101	0,3273	0,2028	0,0000

Continuação dos dados de barra do sistema teste de 232 barras.

N° da barra	\bar{P} (MW)	\bar{Q} (Mvar)	Q_{sh} (Mvar)	N° da barra	\bar{P} (MW)	\bar{Q} (Mvar)	Q_{sh} (Mvar)
102	0,5100	0,3161	0,6000	154	0,0000	0,0000	0,0000
103	0,3400	0,2107	0,0000	155	0,5950	0,3688	0,6000
104	0,3825	0,2371	0,0000	156	0,1700	0,1054	0,0000
105	0,2550	0,1580	0,0000	157	0,1275	0,0790	0,0000
106	0,0850	0,0527	0,0000	158	0,0850	0,0527	0,0000
107	0,0850	0,0527	0,0000	159	0,0425	0,0263	0,0000
108	0,1700	0,1054	0,0000	160	0,3400	0,2107	0,0000
109	0,0000	0,0000	0,0000	161	0,5100	0,3161	0,3000
110	0,0000	0,0000	0,0000	162	0,2550	0,1580	0,0000
111	0,4250	0,2634	0,6000	163	0,0000	0,0000	0,0000
112	0,3400	0,2107	0,0000	164	0,0000	0,0000	0,0000
113	0,3825	0,2371	0,6000	165	0,0000	0,0000	0,0000
114	0,6375	0,3951	0,6000	166	0,0000	0,0000	0,0000
115	0,7820	0,4846	0,0000	167	0,0000	0,0000	0,0000
116	0,2550	0,1580	0,0000	168	0,0000	0,0000	0,0000
117	0,1870	0,1159	0,0000	169	0,0000	0,0000	0,0000
118	0,0000	0,0000	0,0000	170	0,0000	0,0000	0,0000
119	0,1275	0,0790	0,0000	171	0,0000	0,0000	0,0000
120	0,1275	0,0790	0,0000	172	0,0000	0,0000	0,0000
121	0,0000	0,0000	0,6000	173	0,4675	0,2897	0,0000
122	0,0085	0,0053	0,0000	174	0,4250	0,2634	0,9000
123	0,4760	0,2950	0,0000	175	0,2550	0,1580	0,0000
124	0,1445	0,0896	0,6000	176	0,4250	0,2634	0,0000
125	0,0723	0,0448	0,0000	177	0,2125	0,1317	0,0000
126	0,3995	0,2476	0,0000	200	0,0553	0,0342	0,0000
127	0,0043	0,0026	0,0000	201	0,3528	0,2186	0,0000
128	0,1105	0,0685	0,0000	202	0,2975	0,1844	0,0000
129	0,2380	0,1475	0,6000	203	0,0850	0,0527	0,0000
130	0,2125	0,1317	0,0000	204	0,0850	0,0527	0,0000
131	0,0850	0,0527	0,0000	205	0,2125	0,1317	0,0000
132	0,0638	0,0395	0,0000	206	0,1275	0,0790	0,0000
133	0,0638	0,0395	0,0000	207	0,0850	0,0527	0,0000
134	0,0000	0,0000	0,0000	208	0,0340	0,0211	0,6000
135	0,0000	0,0000	0,0000	209	0,0340	0,0211	0,6000
136	0,0000	0,0000	0,0000	210	0,0000	0,0000	0,0000
150	0,0000	0,0000	0,0000	211	0,0000	0,0000	0,0000
151	0,0425	0,0263	0,0000	212	0,0000	0,0000	0,0000
152	0,0425	0,0263	0,0000	213	0,0425	0,0263	0,0000
153	1,2623	0,7823	0,0000	214	0,1275	0,0790	0,0000

Continuação dos dados de barra do sistema teste de 232 barras.

N° da barra	\bar{P} (MW)	\bar{Q} (Mvar)	Q_{sh} (Mvar)	N° da barra	\bar{P} (MW)	\bar{Q} (Mvar)	Q_{sh} (Mvar)
215	0,0425	0,0263	0,0000	269	0,0043	0,0026	0,0000
216	0,0425	0,0263	0,0000	270	0,0850	0,0527	0,0000
217	0,0000	0,0000	0,0000	271	0,0850	0,0527	0,0000
218	0,0000	0,0000	0,0000	272	0,0000	0,0000	0,9000
219	0,0000	0,0000	0,6000	273	0,6800	0,4214	0,0000
220	0,3400	0,2107	0,0000	274	0,6800	0,4214	0,0000
221	0,0000	0,0000	0,6000	300	0,0000	0,0000	0,0000
222	0,1488	0,0922	0,0000	301	0,0000	0,0000	0,4500
223	0,0638	0,0395	0,0000	302	0,0000	0,0000	0,0000
224	0,0213	0,0132	0,0000	303	0,0553	0,0342	0,9000
225	0,0425	0,0263	0,0000	304	0,9478	0,5874	0,0000
226	0,1913	0,1185	0,0000	305	0,8500	0,5268	0,0000
227	0,0425	0,0263	0,0000	306	0,5100	0,3161	0,0000
228	0,0000	0,0000	0,0000	307	0,3188	0,1975	0,0000
229	0,0850	0,0527	0,0000	308	0,2125	0,1317	0,0000
230	0,0850	0,0527	0,0000	309	0,1275	0,0790	0,0000
231	0,4675	0,2897	0,0000	310	0,0638	0,0395	0,0000
232	0,1275	0,0790	0,0000	311	0,5100	0,3161	0,0000
233	0,2125	0,1317	0,0000	312	0,2550	0,1580	0,0000
234	0,2125	0,1317	0,0000	313	0,0425	0,0263	0,9000
250	0,0000	0,0000	0,0000	314	0,0000	0,0000	0,0000
251	0,0213	0,0132	0,0000	315	0,4675	0,2897	0,0000
252	0,0000	0,0000	0,0000	316	0,0850	0,0527	0,0000
253	0,0850	0,0527	0,0000	317	0,0000	0,0000	0,0000
254	0,0595	0,0369	0,0000	318	0,0000	0,0000	0,0000
255	0,0043	0,0026	0,9000	319	0,1700	0,1054	0,0000
256	0,1063	0,0659	0,0000	320	0,1063	0,0659	0,0000
257	0,5525	0,3424	0,0000	321	0,5313	0,3292	1,2000
258	0,1063	0,0659	0,9000	322	0,4675	0,2897	0,6000
259	0,0850	0,0527	0,0000	323	0,0000	0,0000	0,0000
260	0,1275	0,0790	0,0000	324	0,4250	0,2634	0,0000
261	0,0468	0,0290	0,0000	325	0,8075	0,5004	0,0000
262	0,0808	0,0500	0,0000	326	0,0850	0,0527	0,0000
263	0,9350	0,5795	0,0000	327	0,3400	0,2107	0,6000
264	0,8500	0,5268	0,0000	328	0,1275	0,0790	0,0000
265	0,0213	0,0132	0,0000	329	0,0850	0,0527	0,0000
266	0,3358	0,2081	0,0000	—	—	—	—
267	0,2125	0,1317	0,0000	—	—	—	—
268	0,1063	0,0659	0,0000	—	—	—	—

Tabela 19. Dados de carga não linear do sistema de 232 barras.

N° da barra	\check{P} (MW)	\check{Q} (Mvar)
110	0,5000	0,3000
154	0,5000	0,3000
172	0,5000	0,3000
323	0,5000	0,3000

Tabela 20. Espectro das correntes harmônicas das cargas não lineares do sistema de 232 barras.

Barra	Valor % / Ordem harmônica							
	5	7	11	13	17	19	23	25
110	14,3∠339,2°	9,2∠137,7°	4,3∠263,2°	3,2∠39,8°	2,5∠182,4°	2,0∠287,0°	1,7∠-95,5°	1,2∠-182,7°
154	20,0∠-67,8°	14,3∠11,9°	9,1∠-7,2°	7,7∠68,6°	5,9∠46,5°	5,3∠116,4°	4,3∠87,5°	4,0∠159,3°
172	10,6∠-124,4°	8,3∠-29,9°	7,3∠-23,7°	4,5∠71,5°	3,2∠77,1°	2,1∠173,4°	0,8∠178,0°	0,0∠0,0°
323	20,0∠-67,8°	14,3∠11,9°	9,1∠-7,2°	7,7∠68,6°	5,9∠46,5°	5,3∠116,4°	4,3∠87,5°	4,0∠159,3°

Apêndice B

Durante o desenvolvimento desta Tese diversos trabalhos foram submetidos a congressos no Brasil e exterior, resultando nas seguintes publicações:

Nome do evento	Título	Autores
V Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica, Aracaju, Brasil, 17 a 20 de Agosto de 2003.	Algoritmos Genéticos Aplicados ao Projeto de Filtros Harmônicos Passivos em Sistemas Elétricos de Distribuição	Franklin M. P. Pamplona Benemar A. Souza
Conferência Iberoamericana em Sistemas, Cibernética e Informática - CISCI 2004, Orlando, Florida, EUA, 21 a 25 de Julho de 2004.	Aplicação de Algoritmos Evolutivos ao Planejamento de Filtros Harmônicos Passivos em Sistemas Elétricos de Distribuição	Franklin M. P. Pamplona Benemar A. Souza
11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Lake Placid, EUA, 12 a 15 de Setembro de 2004.	Harmonic Passive Filter Planning In Radial Distribution Systems Using Microgenetic Algorithms	Franklin M. P. Pamplona Benemar A. Souza
XV Congresso Brasileiro de Automática, Gramado, Brasil, 21 a 24 de Setembro de 2004.	Aplicação de Algoritmos Genéticos ao Planejamento de Filtros Harmônicos Passivos em Sistemas Elétricos de Distribuição	Franklin M. P. Pamplona Benemar A. Souza
2004 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, São Paulo, Brasil, 08 a 11 de Novembro de 2004.	Harmonic Passive Filter Planning In Radial Distribution Systems Using Genetic Algorithms	Franklin M. P. Pamplona Benemar A. Souza
V Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica, Belém, Brasil, 21 a 25 de Agosto de 2005.	Controle integrado do perfil de tensão e de distorções harmônicas em alimentadores radiais de distribuição com aplicação simultânea de reguladores de tensão e filtros harmônicos passivos	Angelo M.F. Almeida Franklin M. P. Pamplona Helon D. M. Braz Benemar A. Souza

