



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO DA COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA
REATIVA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO
RESTRICÇÕES DE DISTORÇÃO HARMÔNICA**

TESE DE DOUTORADO

MANOEL SOCORRO SANTOS AZEVEDO

BELÉM, PARÁ

2014

**OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DA COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA
REATIVA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO
RESTRICÇÕES DE DISTORÇÃO HARMÔNICA**

MANOEL SOCORRO SANTOS AZEVEDO

Tese de Doutorado apresentada à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará (UFPA) como parte dos requisitos finais para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

PROF. Dr. UBIRATAN HOLANDA BEZERRA - UFPA

Orientador

PROFA. Dra. MARIA EMÍLIA DE LIMA TOSTES - UFPA

Co-Orientadora

BELÉM, PARÁ

2014

Azevedo. Manoel Socorro Santos.

Otimização Multiobjetivo da Compensação de potência reativa em redes de distribuição considerando restrições de distorção harmônica. Manoel Socorro Santos Azevedo; orientador Ubiratan Holanda Bezerra. TD 09. 2014.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Belém, 2014.

1. Sistemas de energia elétrica – modelos matemáticos. 2. Compensação de potência reativa. 3. Harmônicos (ondas elétricas). 4. Inteligência computacional. Orientador. II. Título.

CDD 22. ed. 621.3191

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

“OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DA COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO RESTRIÇÕES DE DISTRORÇÃO HARMÔNICA”

AUTOR: MANOEL SOCORRO SANTOS AZEVEDO

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM: 14/11/2014.

BANCA EXAMINADORA:




Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra

(Orientador – PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Maria Emília de Lima Tostes

(Co-Orientadora – PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Roberto Célio Limão de Oliveira

(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



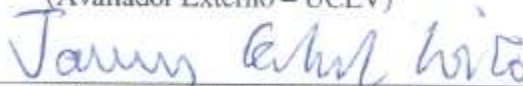
Prof. Dr. Carlos Alberto de Leon Benitez

(Avaliador Externo – UCLV)



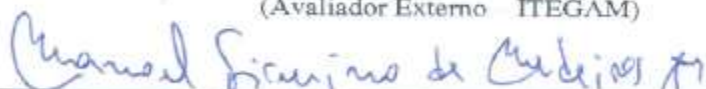
Prof. Dr. Ignacio Pérez Abril

(Avaliador Externo – UCLV)



Prof. Dr. Jandecy Cabral Leite

(Avaliador Externo – ITEGAM)



Prof. Dr. Manoel Firmino de Medeiros Júnior

(Avaliador Externo – UFRN)

VISTO:



Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes

(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

AGRADECIMENTOS

A DEUS sobre todas as coisas.

Aos meus pais, pelos valores éticos e morais que me foram ensinados desde os primeiros anos de vida.

Aos meus queridos irmãos: Edevaldo, Erivaldo, João Danunzio, Iranilza, Iraneide, Iranilce, Edney e Denize pelo amor e espírito de união.

Aos Professores, Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra, Prof. Dr. Jandecy Cabral Leite Prof. Dr. Ignacio Perez Abril e Prof. Dr. Carlos Alberto De Leon pela orientação, competência e dedicação à realização desta tese.

Ao amigo Dr. Jandecy Cabral Leite pela competência, dedicação, ajuda e amizade.

Aos Professores Doutores Marcus Vinícius Alves Nunes e Evaldo Gonçalves Pelaes pela capacidade e habilidade na coordenação do curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do ITEC-UFPA.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do ITEC-UFPA, em especial Prof. Dr. José Augusto Lima Barreiros pelo apoio e convênio entre o ITEGAM e UFPA que trouxe para a Manaus maiores oportunidades para todos nos seus estudos.

Aos colaboradores da secretaria do PPGEE-UFPA.

Aos colaboradores do ITEGAM que sempre apoiaram nesta jornada.

Ao coordenador Ricardo Barbosa da Silva do UNINORTE que permitiu várias vezes minhas viagens a Belém para resolver as questões deste curso.

Aos meus colegas da UEA Raimundo Correa, Walter Andres Vermehren Valenzuela e Jucimar Junior.

Aos amigos, Jorge de Almeida Brito Junior, Weverson dos Santos Cirino, Benevaldo Pereira Gonçalves, Elcimar Souza Correa, Orlewilson Alysson Silva, Francisca Cruz e todos os alunos da UEA e da UNINORTE.

A minha Sobrinha, Tenente Cassia Cunha de Lima, ao amigo Davi Vale de Lima e ao meu sobrinho Daniel Eduardo da Silva Cunha pela ajuda nas correções quando solicitadas.

A todos os Stakeholders trabalhados.

Epígrafe

“Bem-aventurado o homem que acha sabedoria, e o homem que adquire conhecimento.”

Prov. 3.13

Dedicatória

Aos meus filhos Alysson, Andreza e Henrique
A minha esposa Franciana Cunha em especial

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS.....	12
LISTA DE SIGLAS.....	13
RESUMO	15
ABSTRACT	16
CAPÍTULO I.....	15
INTRODUÇÃO GERAL.....	15
1.1 Motivação.....	15
1.2 A tese em etapas.....	16
1.3 Objetivos da tese	17
1.3.1 Objetivo Geral da Tese.....	17
1.3.2 Objetivos específicos.....	17
1.4 Contribuição e relevância do estudo	18
1.5 Pesquisas relacionadas com a compensação da potência reativa em sistemas elétricos de distribuição.....	18
1.6 Estrutura da tese	28
CAPÍTULO II.....	30
COMPENSAÇÃO DA POTÊNCIA REATIVA	30
2.1 Introdução.....	30
2.2 Fator de potência.....	30
2.2.1 Redução das contas de energia elétrica.....	31
2.2.2 Aumento da capacidade do sistema	32
2.2.3 Redução de perdas de potência e de energia para o sistema	32
2.2.4 Melhoria das condições de tensão do sistema.....	35
2.3 Saturação dos capacitores.....	36
2.4 Harmônicos e capacitores.....	36
2.4.1 Ressonâncias	37
2.4.1.1 Ressonância série	38
2.4.2.2 Ressonância paralelo.....	39
2.5 Filtros harmônicos.....	40
2.5.1 Filtros sintonizados	41
2.5.1.1 Variação dos parâmetros	43
2.5.2 Filtros de segunda ordem	44
2.6 Conclusões	45
CAPÍTULO III.....	47
QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	47
3.1 Introdução	47
3.2 Normas da qualidade da energia elétrica: PRODIST-Módulo 8.....	48
3.2.1 Conformidade de tensão em regime permanente	50
3.2.2 Distorções na Forma de Onda: Harmônicos	50
3.3 Análise de harmônicos	54
3.3.1 Fluxo de harmônicos	55
3.3.2 Fluxo de potência a frequência fundamental.....	57
3.4 Implementação computacional.....	59
3.4.1 Implementação do cálculo de fluxo de harmônicos	61
3.4.2 Implementação do fluxo de potência à frequência fundamental.....	62
3.5 Conclusões	63
CAPÍTULO IV	64
OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DA COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA	64
4.1 Introdução	64
4.2 Modelo matemático do problema.....	65

4.2.1 Variáveis do problema	66
4.2.2.1 Custo de investimento dos compensadores	70
4.2.2.2 Custo anual de operação da rede	70
4.2.2.3 Valor presente líquido do projeto	71
4.2.2.4 Distorção harmônica total	72
4.3 Algoritmo de otimização	74
4.3.1 Características do algoritmo utilizado	77
4.3.1.1 Operador de cruzamento	78
4.3.1.2 Operador de mutação	78
4.3.2 Cálculo das funções objetivo e restrições	79
4.3.3 Algoritmo principal de otimização	80
CAPÍTULO V	82
APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO	82
5.1 Introdução	82
5.2 Rede Elétrica para o Estudo de Caso	82
5.4 Caso com alta penetração harmônica	95
5.5 Considerações finais	100
CAPÍTULO VI	101
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101
6.1 Conclusões	101
6.2 Recomendações	102
REFERÊNCIAS	103
APÊNDICE A	111
DADOS DO CIRCUITO DE TESTE	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 2 - Circuito radial com carga reativa e um banco de capacitores.	34
Figura 2. 3 - Incremento da tensão ao longo do circuito.	35
Figura 2. 4 - Indutâncias, capacitâncias e fontes de harmônicos.....	37
Figura 2. 5 - Ressonância série.....	38
Figura 2. 6 - Impedância versus Frequência em um circuito com ressonância série.	38
Figura 2. 7 - Ressonância paralelo.	39
Figura 2. 8 - Impedância versus Frequência em um circuito com ressonância paralelo.	40
Figura 2. 9 - Efeito do filtro paralelo.	41
Figura 2. 10 - Filtro sintonizado. a) Circuito, b) Impedância versus frequência.....	42
Figura 2. 11 - Filtro de segunda ordem. a) Circuito, b) Impedância versus frequência.	44
Figura 3. 1 - Propagação de harmônicos pela rede.....	54
Figura 3. 2 - Modelo equivalente do Norton.	56
Figura 3. 3 - Adição de um elemento.	60
Figura 4. 1 - Esquema do cromossomo.	67
Figura 4. 2 - Ordenamento de frentes não dominada. (problema de dois objetivos).	75
Figura 4. 3 - Distância à multidão.	76
Figura 4. 4 - Obtenção da população P_{t+1}	77
Figura 5. 1 - Diagrama unifilar do alimentador “Aparecida 3”.....	83
Figura 5. 2 - Perfil de tensões para os três estados de carga.	85
Figura 5. 3 - Perfil do DTT para os três estados de carga.	85
Figura 5. 4 - Perfis do $DITh$ dos distintos harmônicos para o estado de máxima carga e para os três estados de carga.....	86
Figura 5. 5 - Convergência das soluções (população = 100, gerações = 150).	87
Figura 5. 6 - Influência do número de gerações (população = 100).....	88
Figura 5. 7 - Influência do tamanho da população (gerações = 150).	89
Figura 5. 8 - Fronteira de Pareto (população = 100, gerações = 150).	90
Figura 5. 9 - Perfis de tensão para os três estados de carga, antes e depois de aplicada a solução (1)	91

Figura 5.10 - Perfis do <i>DTT</i> para os três estados de carga, antes e depois de aplicada a solução (1)	92
Figura 5. 11 - Perfis do <i>DTT</i> para os três estados de carga, antes e depois de aplicada a solução (3)	93
Figura 5. 12 - Fronteiras de Pareto (população = 50, gerações = 150).	94
Figura 5. 13 - Fronteira de Pareto (população = 50, gerações = 150)	96
Figura 5. 14 - Perfis do <i>DTT</i> antes e depois de aplicada a solução (3)	97
Figura 5. 15 - Fronteira de Pareto (população = 50, gerações = 50)	99
Figura 5. 16 - Perfis do <i>DTT</i> antes e depois de aplicada a solução	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 - Limites de variação da tensão (V) em por cento da tensão contratada.	50
Tabela 3. 2 - Terminologia	51
Tabela 3. 3 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais.....	52
Tabela 3. 4 - Níveis de referência para distorções harmônicas individual de tensão (em percentagem da tensão fundamental)	52
Tabela 4. 1 - Composição do cromossomo.....	67
Tabela 4. 2 - Avaliação das restrições.	74
Tabela 5. 1 - Estados de carga	82
Tabela 5. 2 - Resultados iniciais	84
Tabela 5. 3 - Tempo de execução (minutos).....	89
Tabela 5. 4 - Parâmetros das soluções selecionadas.....	91
Tabela 5. 5 - Resultados iniciais (caso 2)	95
Tabela 5. 6 - Parâmetros das soluções selecionadas.....	96
Tabela 5. 7 - Resultados iniciais (caso 2 modificado).....	98
Tabela 5. 8 - Parâmetros da solução assinalada.....	98
Tabela A. 1 - Dados do alimentador de distribuição	113
Tabela A. 2 - Espectro harmônico característico das cargas não-lineares.....	116
Tabela A. 3 - Estados de carga	116

LISTA DE SIGLAS

PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A
PIM	Pólo Industrial de Manaus
MATLAB	Matrix Laboratory
SQP	Sequential Quadratic Programming
SA	Simulated Annealing
DE	Differential Evolution
ANN	Artificial Neural Networks
PSO	Particle Swarm Optimization
AG	Algoritmo Genético
PCC	Ponto de Conexão Comum
ASPS	Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
THD	Total Harmonic Distortion
THDI	Current Total Harmonic Distortion
THDV	Voltage Total Harmonic Distortion
TDD	Total Demand Distortion
MOPSO	Discrete Multi-Objective Particle Swarm Optimization
ACO	Ant Colony Optimization
IEC	International Electrotechnical Commission
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional – MODULO 8 – ANEEL
EMC	Electromagnetic Compatibility
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
Q	Fator de Qualidade
XI	Reatância Indutiva
Xc	Reatância Capacitiva
Nnew	Frequência de Ressonância

Nnom	Frequência de sintonia nominal do filtro
Z	Impedância
R	Resistência
Rms	Root Mean Square
GWHFT	Task Force of the Harmonics Working Group
SMHFT	Task Force on Harmonics Modeling and Simulation
VPL	Valor Presente Líquido
Cfg	Tipo de configuração
M	Número de ramos sintonizados
Qc	Potência reativa total nos capacitores
Fd1, ..., Fdw+1	Fatores de distribuição da potência reativa entre todos os ramos
Fq1, ..., Fqw+3	Frequências de sintonia de todos os ramos
Q1, ..., Qw+3	Fatores de qualidade de todos os ramos
NPGA	Niched Pareto Genetic Algorithm
HLGA	Hajela's and Lin's Genetic Algorithm
VEGA	Vector Evaluated Genetic Algorithm
SPEA	Strength Pareto Evolutionary Algorithm
NSGA II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

RESUMO

A localização de bancos de capacitores nas redes de distribuição de energia elétrica, corretamente dimensionados, busca compensar eventuais excessos de circulação de potência reativa pelas linhas, o que implica a redução de custos operacionais pela redução das perdas de energia e um aumento da capacidade de transmissão de potência ativa assegurando os níveis estabelecidos de tensão e fator de potência simultaneamente. A proliferação das cargas não lineares provocou uma mudança nos cenários de estudo dos sistemas elétricos de potência devido aos efeitos nocivos que os harmônicos gerados por elas ocasionam sobre a qualidade da energia elétrica. Considerando este novo cenário, esta tese tem como objetivo geral desenvolver uma ferramenta computacional utilizando técnicas de inteligência computacional apoiada em algoritmos genéticos (AG), para a otimização multiobjetivo da compensação da potência reativa em redes elétricas de distribuição capaz de localizar e dimensionar de forma ótima as unidades de compensação necessárias para obter os melhores benefícios econômicos e a manutenção dos índices de qualidade da energia estabelecidos pelas normas brasileiras. Como Inovação Tecnológica do trabalho a ferramenta computacional desenvolvida permite otimizar a compensação da potência reativa para melhorar do fator de potência em redes de distribuição contaminadas com harmônicos que, diferentemente de métodos anteriores, não só emprega bancos de capacitores, mas também filtros de harmônicos com esse objetivo. Utiliza-se o algoritmo NSGA-II, que determina as soluções ótimas de Pareto para o problema e permite ao especialista determinar as soluções mais efetivas. A proposta para a solução do problema apresenta várias inovações podendo-se destacar que a solução obtida permite determinar a compensação de potência reativa com capacitores em sistemas com certa penetração harmônica, atendendo a normas de qualidade de energia pertinentes, com relação aos níveis de distorção harmônica tolerados.

Palavras-Chave: Algoritmos Genéticos, Harmônicos, Qualidade de Energia Elétrica e Distribuição de Energia Elétrica.

ABSTRACT

The localization of capacitors banks in the electric power distribution networks, correctly sized, looks for to compensate eventual excesses of circulation of reactive power for transmission lines, what implies the reduction of operational costs for the reduction of the energy losses and an increase of the capacity of transmission of active power assuring the established levels of voltage and power factor simultaneously. The proliferation of the nonlinear loads produced a change in the scenarios of study of the electric power systems due to the degradation effects that the harmonic generated by them cause about the quality of the electric power. Considering this new scenario, this thesis has as general objective to develop a computational tool using computational intelligence supported in genetic algorithms (GA), for the multiobjective optimization of the reactive power compensation in distribution electric networks able to locate and size in a good way the necessary compensation units to achieve the best economic benefits and the maintenance of the indexes of quality of the energy settled down by the Brazilian norms. As technological innovation of the work, the developed computational tool allows to optimize the compensation of the reactive power to improve the power factor in polluted distribution networks with harmonics that, differently of previous methods, not alone it uses capacitors banks, but also harmonic filters with that objective. The NSGA-II algorithm is used to determine optimal solutions of Pareto for the problem and it allows the specialist to determine the most effective solutions. The formulation proposed in this thesis for the solution of the problem presents several novelties being able to highlight that the achieved solution allows to determine the compensation of reactive power in systems with certain harmonic penetration, complying with pertinent standards of power quality, with respect to the tolerated levels of harmonic distortion.

Keywords: Genetic Algorithms, Electric Power Quality and Electric Power Distribution.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Motivação

A circulação de potência reativa na rede pode ter efeitos prejudiciais para a operação de qualquer sistema elétrico visto que incrementa as perdas de energia devido a sua transferência pela rede, além de contribuir para a diminuição da tensão de operação das cargas com possíveis efeitos prejudiciais ao seu funcionamento, reduzindo também a capacidade elétrica dos geradores, transformadores, linhas e outros elementos, além de ter um efeito econômico negativo pela redução do fator de potência (FP) nas indústrias.

Os sistemas de distribuição primária são redes radiais de média tensão que alimentam um grande conjunto de cargas caracterizadas por seu comportamento variável no tempo. Dentre as cargas destes circuitos, destacam-se fundamentalmente as cargas de edifícios comerciais e residenciais, e também pequenas instalações industriais que podem ser alimentadas a média tensão. Em todos os casos, estes consumidores não só apresentam uma demanda de potência reativa, mas também, contém uma grande diversidade de pequenas cargas lineares e não lineares dentro das quais se destacam os equipamentos eletrodomésticos e de escritório, a iluminação, entre outros.

A necessidade de se ter controle do FP, reduzir os níveis de perdas de energia e manter os níveis de tensão estabelecidos pelas normas da Agência Nacional da Energia Elétrica (ANEEL), faz com que as empresas de distribuição de energia elétrica utilizem bancos de capacitores para compensar a potência reativa das cargas nos circuitos de distribuição.

O processo de seleção do número, o tamanho e a localização dos bancos de capacitores necessários no sistema de distribuição é um problema complexo cuja solução otimizada implica a consideração de grande número de variáveis e restrições.

A proliferação das cargas não lineares tanto em instalações industriais como residenciais, provocou uma mudança nos cenários de estudos dos sistemas elétricos de potência devido aos efeitos nocivos que os harmônicos gerados por elas ocasionam sobre a qualidade da energia elétrica. Em termos da Compensação da Potência Reativa (CPR) se faz necessário ter presente esta condição que se tem feito comum em qualquer sistema elétrico. Atualmente procura-se obter uma compensação ótima da potência reativa mantendo os índices de qualidade da energia elétrica conforme estabelecem as normas correspondentes.

No caso do Brasil, a ANEEL definiu as normas correspondentes ao tema da qualidade de energia em seus Procedimentos de Distribuição da Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 (ANEEL-PRODIST, 2012). Esta norma deve ser cumprida em qualquer medida da CPR que se projete para os circuitos de distribuição primária.

O emprego de bancos de capacitores nos sistemas de distribuição pode ter seu desempenho comprometido ante a presença de harmônicos no sistema devido ao fenômeno de ressonância que podem aumentar os níveis de harmônicos de tensão e corrente previamente existentes no circuito. Desta maneira, faz-se necessário desenvolver procedimentos e algoritmos que permitam avaliar tais condições de ressonâncias de modo que possa ser evitada com as variações de compensação determinadas, questão esta que é tratada no desenvolvimento desta tese.

Entretanto, há casos em que não é possível obter variações de compensação com capacitores que atendam os limites de harmônicos estabelecidos pela norma PRODIST. Nestes casos é preciso empregar filtros harmônicos com esta finalidade, de modo que os mesmos possam realizar tanto a ação de filtragem como a da CPR. Embora os filtros harmônicos ativos tenham tido um grande desenvolvimento para as aplicações industriais, os filtros mais empregados nos circuitos de distribuição primária são os filtros passivos de tipo paralelo, os quais serão considerados nesta tese como compensadores de potência reativa a serem empregados nestes circuitos.

1.2 A tese em etapas

Tendo presente a importância e atualidade do tema tratado, a presente tese se desenvolve em duas etapas principais:

1ª Etapa

Estudo de metodologias e procedimentos relacionados com a compensação da potência reativa em redes de distribuição. Desenvolvimento dos modelos e ferramentas computacionais apoiados em técnicas de inteligência computacional capazes de avaliar alternativas para a realização desta atividade nas condições do sistema elétrico brasileiro e que complementem as ações a serem realizadas para dar cumprimento a norma estabelecida pelo PRODIST. Dada a natureza multifatorial da análise a ser realizada, estas ações que são ordenadas em um plano lógico sob o princípio de otimização multiobjetivo dos custos de

investimento e operação permite realizar a compensação da potência reativa em redes de distribuição.

2ª Etapa

Aplicação e validação das ferramentas desenvolvidas.

1.3 Objetivos da tese

1.3.1 Objetivo Geral da Tese

Desenvolver uma ferramenta computacional utilizando técnicas de inteligência computacional e particularmente algoritmos genéticos (AG), para a otimização multiobjetivo da CPR em redes elétricas de distribuição capaz de localizar e dimensionar de forma ótima as unidades de compensação necessárias (capacitores e/ou filtros de harmônicos passivos) para obter os melhores benefícios econômicos e a manutenção dos índices de qualidade da energia elétrica (QEE) estabelecidos pelas normas brasileiras.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Modelar matematicamente o problema da CPR em sistemas elétricos de distribuição contaminados por harmônicos mediante a utilização de compensadores formados por bancos de capacitores fixos e/ou filtros passivos de harmônicos;
2. Desenvolver um procedimento matemático e ferramenta computacional para a otimização multiobjetivo da CPR e a compensação de harmônicos considerando todos os aspectos técnicos e econômicos do problema e as restrições pertinentes;
3. Desenvolver uma implementação computacional eficiente do método que permita determinar múltiplas variações de soluções definidas pelo número, localização e parâmetros dos compensadores a serem utilizados;
4. Aplicar as ferramentas desenvolvidas em casos práticos.

1.4 Contribuição e relevância do estudo

O problema da CPR em redes de distribuição foi amplamente tratado na bibliografia especializada, mas não pode ser considerado como algo resolvido, sobretudo no caso dos sistemas na presença de harmônicos. Muitos autores se dedicam exclusivamente à análise de sistemas com cargas lineares, enquanto que na maioria dos casos, os autores que tratam do uso de filtros para reduzir a distorção harmônica presente nos circuitos deixam os objetivos da CPR em um segundo plano.

Nesta pesquisa, propõem-se uma nova formulação multiobjetivo para o problema de otimização que é resolvida mediante o AG elitista, multiobjetivo *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA-II). A formulação do problema inclui tanto as funções econômicas pertinentes à CPR como a função de controle de distorção que é clássica dos problemas de filtragem de harmônicos. Todas as restrições pertinentes da QEE e de saturação dos capacitores empregados são consideradas.

Como Inovação Tecnológica e contribuição deste trabalho, a ferramenta computacional desenvolvida permite determinar o número, tipo, localização e parâmetros ótimos dos compensadores de forma automatizada. O conjunto de soluções de Pareto obtidas pelo algoritmo incluem variações de projeto como: somente com bancos de capacitores, com bancos de capacitores e filtros e com somente filtros de harmônicos, todas com diferentes desempenhos nos distintos objetivos otimizados.

1.5 Pesquisas relacionadas com a compensação da potência reativa em sistemas elétricos de distribuição.

Vários foram os métodos desenvolvidos para resolver de forma ótima o problema da determinação da capacidade e localização dos bancos de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica e estes podem ser agrupados em duas grandes categorias:

1. Métodos convencionais, que incluem métodos analíticos e métodos de programação linear e não linear ou a combinação de ambos;
2. Métodos apoiados em técnicas de inteligência computacional, que incluem algoritmos de busca como: “*Simulated Annealing* (SA)”, “*Particle Swarn Optimization* (PSO)”, Algoritmos Evolutivos (AE), Lógica Difusa (LD) entre outros.

Estes métodos vieram evoluindo na mesma medida em que se desenvolveram ferramentas computacionais. Inicialmente, a função objetivo a ser otimizada limitava-se à redução das perdas de potência no circuito. Na atualidade da evolução dos métodos de análise, a função objetivo a ser otimizada, além de considerar os efeitos sobre as perdas de potência e os custos dos equipamentos compensadores, considera os efeitos sobre a tensão e a QEE fornecida, assim como as restrições pertinentes a este tipo de problema. Na atualidade, os métodos de otimização multiobjetivo foram tomando um lugar preponderante em todos os ramos da engenharia, incluindo as aplicações nos problemas de CPR.

A seguir, é realizada uma análise dos diferentes métodos tratados na literatura especializada, em que, enfatiza-se a evolução da formulação deste problema nos últimos anos quanto às funções objetivo e restrições consideradas.

Os trabalhos iniciais registrados na literatura estiveram apoiados fundamentalmente em métodos analíticos considerando a carga uniformemente distribuída em um único alimentador radial sem derivações.

Cook (1959-1961) considerou como objetivo em 1959 a redução de perdas de energia, definindo a conhecida regra dos $2/3$ para maximizar a redução de perdas. De acordo com esta regra, deve-se colocar um banco de capacitores com capacidade igual a $2/3$ da potência de pico, distante da subestação de $2/3$ do comprimento total do alimentador. Em 1961, Cook estende seu trabalho para considerar capacitores fixos e variáveis. Os benefícios econômicos são evidenciados por meio da redução de perdas em potência e energia.

Schmill (1965) considera cargas uniformemente distribuídas nos alimentadores, mas já estende o trabalho a cargas variáveis. É um trabalho de ampliação dos de Cook.

Duran (1968) considera a capacidade dos bancos de capacitores como uma variável discreta e a solução ótima para sua localização é encontrada aplicando técnicas de programação dinâmica.

Petrelt (1971) é um dos primeiros autores a considerar que o objetivo principal não é o econômico, mas sim a melhoria do perfil de tensões na rede.

A partir da década de 80, devido à evolução tecnológica, os métodos até então desenvolvidos experimentam grandes transformações.

Grainger (1981-1982), formula o problema mediante técnicas de programação não linear considerando o número e localização de bancos como variáveis contínuas. Neste trabalho foi proposto um modelo que considera as cargas não uniformemente distribuídas. A função objetivo possui dois componentes: a redução da demanda de pico e das perdas de

energia considerando a seleção e localização dos capacitores. Consideram-se os custos dos capacitores de forma linear com a sua potência.

Baran e Wu (1989) apresentaram dois trabalhos muito citados sobre o problema de localização de capacitores em redes radiais, pela forma como abordaram o assunto e o modelo que propõem cujas equações são referidas e utilizadas em muitos trabalhos posteriores, e também por apresentarem uma aplicação prática da metodologia proposta a uma rede que serve até hoje como “rede de teste” para muitos trabalhos publicados em revistas científicas sobre o tema. Os objetivos destes trabalhos são os de redução das perdas de energia, e a regulação da tensão nos níveis desejados, mantendo o custo da instalação dos capacitores no valor mínimo. Os autores formulam o problema como sendo não linear inteiro misto, considerando apenas uma função objetivo na qual se agrupam duas parcelas: uma relativa ao custo das perdas de energia e outra relativa ao custo da instalação de capacitores.

Abril (1995) empregou uma formulação mediante programação quadrática para resolver o problema que considerava o caráter discreto dos capacitores, bem como, localizações e o efeito da tensão sobre a potência das cargas.

Em Baghzouz (1990) e Goswami (1999), os modelos desenvolvidos empregam um algoritmo numérico heurístico apoiado em um método de variação local das variáveis do problema a otimizar. Estes algoritmos são robustos e não requerem grande esforço computacional.

Jiang (1996) é um dos primeiros autores a considerar os efeitos da compensação da potência reativa conjuntamente com a reconfiguração das redes de distribuição para o qual desenvolve um algoritmo heurístico com o objetivo de minimizar as perdas de energia.

Na década de 1990-2000, começam a surgir alguns trabalhos em que os modelos refletem a natureza multiobjetivo do problema, mas poucos em que a metodologia adaptada para a resolução respeite essa característica, tal como em (NIMURA, 1993; CHEN e LIU, 1995; JWO, 1995; CHEN, 1998; VENKATESH, 1999), entre outros. O modelo é multiobjetivo, mas os métodos de resolução baseiam-se apenas na otimização de uma função escalar que agrega as diferentes funções. Um número maior de trabalhos com modelos multiobjetivos surgem em revistas científicas da área depois do ano 2000.

Levitin (2000) desenvolve um método para a localização ótima dos bancos de capacitores em sistemas radiais de distribuição que parte de padrões de cargas obtidos das curvas diárias com a aplicação de métodos estatísticos. Os benefícios calculados incluem: liberação de capacidade, redução de carga de pico e redução de perdas anuais de energia. O problema de otimização considera restrições de tensão mínima e máxima nas barras. Neste

trabalho, o algoritmo genético é capaz de determinar a solução ótima para diferentes cenários, criados a partir das curvas diárias de carga, onde indistintamente estão operando diferentes tipos de consumidores (cargas residenciais, industriais etc.). A questão quanto à localização de capacitores em circuitos radiais de distribuição se apresenta como um problema combinatório misto em inteiros que se propõe resolver mediante busca Tabu incorporando as características dos algoritmos genéticos (GALLEGO, 2001).

Em Mekhamer (2002) foram apresentadas duas novas heurísticas para a localização de capacitores em alimentadores radiais, avaliando a proximidade ou distância da solução ótima mediante um algoritmo que usa uma técnica de variações.

De Souza (2004) propõe um algoritmo micro-genético em conjunção a lógica difusa para solucionar a localização de capacitores em circuitos de distribuição. A função objetivo inclui a economia a ser obtida pela redução de perdas de energia em comparação com os gastos para aquisição dos capacitores. Consideram-se restrições de tensão e emprega-se um fluxo de carga eficiente para avaliar as soluções.

Mendes (2005) desenvolveu um algoritmo apoiado na memética (*Memetic Algorithm*), em que, acrescenta-se uma fase de busca local ao algoritmo genético. Desta maneira é obtido um melhor comportamento do algoritmo genético. Este trabalho considera o emprego de capacitores fixos com um tamanho definido e barras pré-candidatas para sua localização. A função objetivo considera a economia máxima por redução de perdas com o mínimo custo de investimento em capacitores e os custos anuais de manutenção. Todas as barras são candidatas para a localização dos capacitores. Introduce-se uma restrição de capital disponível que limita a busca de soluções factíveis. Como critério inicial localizam-se bancos em ordem decrescente da demanda de potência reativa em cada barra. Como contribuição principal destacam-se as modificações introduzidas ao algoritmo genético, que fazem com que se reduza o tempo de busca da solução.

Ching-Tzong (2001) apresenta um enfoque integrado que compreende a reconfiguração de um alimentador de distribuição e sua CPR mediante capacitores para obter a máxima redução de perdas e a melhora do perfil de tensão nos sistemas de distribuição. Utiliza-se a técnica de otimização de recozimento simulado (SA). Os méritos do método são de proporcionar uma solução muito próxima ao ótimo global do problema.

Wu (2004) dedica-se ao controle da operação diária dos bancos de capacitores instalados em um circuito de distribuição. O objetivo é determinar a operação dos capacitores para o dia seguinte procurando o objetivo de minimizar as perdas de energia diárias.

Ghose (2004) demonstra como o desequilíbrio entre fases e as distorções de corrente influenciam nos estudos de localização de bancos de capacitores em sistemas radiais de distribuição podendo resultar em uma excessiva compensação, a qual pode não constituir uma solução ótima. O método que foi desenvolvido é uma combinação de busca heurística com técnicas de algoritmos genéticos tomando como restrições os limites do percentual de desequilíbrio permitido e de distorção total das correntes.

Chang (2006) propõe um método para a seleção e localização de filtros passivos sintonizados para controlar a distorção da tensão em um sistema. Várias funções objetivo alternativas são consideradas, entre as quais estão: a distorção total de tensão THDV, o Fator de Influência Telefônica (TIF), as perdas devidas aos harmônicos e o custo dos filtros. A localização realiza-se mediante um procedimento iterativo apoiado na sensibilidade da distorção com respeito às localizações dos filtros. Uma vez localizados, o tamanho dos filtros se determina por um algoritmo genético. Esta contribuição considera as separações de frequência dos filtros.

Das (2007) apresenta um algoritmo genético para otimizar uma função imprecisa multiobjetivo que inclui os objetivos de melhorar o perfil de tensão e maximizar a redução de custo em um sistema de distribuição radial mediante a localização de bancos de capacitores. Os dois objetivos são inicialmente *fuzzificados* e depois integrados por meio de uma função objetivo que utiliza fatores de peso apropriados para ambos os propósitos. A técnica de otimização é demonstrada por meio de um exemplo.

Khodr (2008) propõe uma metodologia computacional eficiente para a seleção e localização ótima de bancos de capacitores em sistemas radiais de distribuição. O problema é formulado como a maximização das economias obtidas pela redução em perdas de potência e energia, ao mesmo tempo em que considera os custos evitados pelo adiamento de investimentos na expansão da rede. O método proposto seleciona as barras a serem compensadas, bem como, tamanhos ótimos dos capacitores e suas características de operação. Depois de uma linearização, o problema de otimização é formulado com emprego de programação linear.

Tomislav (2008) analisa a melhoria do FP em sistemas de distribuição que operam em condições assimétricas e não senoidais com um método que minimiza os valores máximos da corrente de linha atendendo às restrições que limitam a distorção total e em consequência os efeitos na melhoria do FP são menores levando-se em consideração as restrições de distorções harmônicas.

Em uma nova contribuição, Gary Chang (2009) modifica seu método de 2006 para considerar as probabilidades de variação dos harmônicos das cargas não lineares e da impedância do sistema de alimentação avaliando a influência nas soluções. Mantém-se o uso de um algoritmo genético para determinar os parâmetros dos filtros e uma heurística prévia para localizá-los no circuito.

Park (2009) desenvolve um método baseado em algoritmo genético para determinar o número e localização de bancos de capacitores em sistemas de distribuição minimizando as perdas de energia e os custos de instalação. Diferentemente de outros métodos, este método considera também as operações de liga/desliga dos bancos de capacitores como um aspecto que reduz a vida útil dos mesmos.

Liu (2009) apoiado em um método de programação não linear, desenvolve um algoritmo para otimizar o controle da potência reativa e a tensão considerando como restrição fundamental a quantidade de operações de entrada e saída dos bancos de capacitores, assim como, a mudança nos tapes dos transformadores, devido a seus efeitos no tempo de vida útil dos dispositivos.

Um algoritmo heurístico eficiente é apresentado em Segura (2010) para resolver o problema de localizar de forma ótima os bancos de capacitores em redes radiais de distribuição. O modelo matemático é formulado como um problema de programação não linear e é solucionado usando um método especial de ponto interior. O algoritmo inclui, além disso, uma estratégia adicional de busca local que permite encontrar um grupo de soluções de qualidade e realizar pequenas alterações na estratégia de otimização.

Seyed (2011) apresenta um algoritmo de otimização para a melhoria simultânea da qualidade da energia, e a seleção e localização ótimas de bancos de capacitores em redes radiais de distribuição na presença de harmônicos. Este algoritmo está apoiado na otimização por enxame de partículas (PSO). A função objetivo inclui o custo das perdas de potência e energia no circuito e nos capacitores. As restrições incluem os limites de tensão, número e tamanho de capacitores instalados em cada barra e os limites de distorção estabelecidos pela Norma IEEE – 519/92.

Pereira (2011) apresenta uma abordagem evolutiva multiobjetivo para o problema de compensação de energia reativa em redes de distribuição de energia elétrica. Neste trabalho descreve-se o desenvolvimento de um modelo de programação multiobjetivo para o problema da localização e dimensionamento de capacitores para a CPR em redes de distribuição considerando aspectos técnicos, econômicos e de qualidade de serviço. As abordagens

metodológicas implementadas permitem a caracterização da fronteira não dominada, com o cálculo de soluções diversas e bem distribuídas.

Tanto Chang (2011) como Tabatabaei (2011) utilizam lógica difusa para representar o problema de compensação. O primeiro com um algoritmo imune e o segundo empregando um algoritmo de alimentos de bactérias para minimizar o custo das perdas de energia, o custo da máxima demanda e melhorar o perfil de tensão do circuito.

Singh (2012) emprega um método de otimização por enxame de partículas para encontrar o tamanho ótimo e localização de capacitores. A consideração de uma curva de carga característica permite a determinação de capacitores fixos e controlados. O método determina as localizações apropriadas dos capacitores por meio de testes dinâmicos de sensibilidade.

Em Ziari (2013) uma estratégia iterativa é proposta para encontrar a capacidade e a localização ótimas de capacitores fixos e controlados em redes de distribuição. O ajuste da derivação do transformador da subestação é otimizado também por meio deste procedimento. A função objetivo está composta pelo custo das perdas nas linhas e pelo custo dos capacitores.

Com o objetivo de reduzir as perdas de energia e de melhorar o perfil de tensão, desenvolve-se um método para determinar as localizações ótimas e os tamanhos dos capacitores para compensar a potência reativa. Emprega-se uma técnica de sensibilidade de perdas para escolher as barras candidatas para a instalação de capacitores. O tamanho do capacitor ótimo nas barras compensadas é determinado otimizando a equação de perdas com respeito à capacidade do capacitor (ZOBAA, 2013).

Com o objetivo de obter uma melhor solução com respeito à localização ótima dos capacitores foi desenvolvido um novo método estocástico para considerar os efeitos da incerteza associada com a previsão das cargas ativas e reativas assim como os coeficientes das funções de custo consideradas nas aplicações (ABDOLLAH, 2013).

Fergany (2013) desenvolve um algoritmo genético com ferramentas de busca de meta heurística, “*Differential Evolution and Pattern Search*”, para determinar a localização ótima dos capacitores em sistemas radiais de distribuição. A função objetivo é formulada para obter máxima redução de perdas de energia ativa nas linhas com o máximo benefício da instalação dos bancos de capacitores em apoio à restrição para manter um perfil de tensão efetivo no sistema.

Muitos autores vincularam os estudos relacionados com a compensação da potência reativa ao problema da qualidade da energia o qual depende em grande parte da composição das cargas presentes nos sistemas de distribuição. Analisam a influência de cargas de

iluminação nos índices de QEE nos sistemas de distribuição (TOSTES, 2005; KOROVELIS, 2004; CUNILL, 2007; WATSON, 2009; (RICHARD, 2010; e RONNBERG, 2010).

Uma forma de se realizar a CPR em sistemas contaminados por harmônicos é empregando filtros harmônicos passivos em lugar de bancos de capacitores. Estes filtros reúnem ambas as funções de compensação, ou seja, são compensadores de harmônicos e também compensadores de potência reativa à frequência fundamental.

Em Chang (1998) foi formulada a questão de planejamento de filtros passivos sintonizados em sistemas elétricos de distribuição a partir da minimização de uma função de custo que inclui o custo anual das perdas de energia considerando vários níveis de carga do sistema, e o custo anual dos filtros sintonizados. Como restrições ao problema consideram-se as restrições de tensão assim como a THDV em cada barra a um valor menor que o valor máximo pré-estabelecido pelas normas.

Hsiao (2001) utilizou o método de simulação de recozimento (SA) para otimizar uma função objetivo declarada como a soma dos custos de investimento e o custo de instalação de um conjunto de filtros sintonizados. O custo de cada filtro é considerado proporcional à potência reativa do capacitor e do indutor. Como restrições ao problema volta-se a incluir as restrições para a tensão e o THDV em cada barra, entretanto, adicionam-se outras duas restrições: a primeira relativa à THDI no PCC e a segunda é relativa à potência reativa total na frequência fundamental dos filtros.

Abril (2003) formula a questão de maximizar o Valor Presente Líquido (VPL) do projeto de compensação que compreende o custo das perdas de energia e o custo de investimento e instalação dos filtros. Neste trabalho é utilizado o método de Programação Quadrática Sequencial (PQS) para o problema de otimização, apresentando bons resultados.

Chang e Wu (2004) apresentam uma formulação de otimização multiobjetivo para filtros de diversos tipos, que se baseia em três objetivos fundamentais a minimizar: a distorção total da demanda de corrente TDD no PCC, o THDV das tensões nas barras do sistema e as perdas dos filtros. Estes três objetivos unem-se em uma só função objetivo composta. As restrições consideradas incluem aquelas estabelecidas pelo IEEE Std. 519-92, ou seja: as restrições de máximo THDV e da distorção individual das tensões, assim como as restrições de máxima TDD e máxima distorção individual da demanda de corrente no PCC. Chang (2005) continua a formulação anterior considerando um enfoque probabilístico para os cenários de operação da rede e envelhecimento (depreciação) dos componentes dos filtros.

Chen (2005) apresenta um enfoque multiobjetivo baseado em três funções independentes a serem minimizadas: distorção total da corrente THDI no PCC, máxima

distorção total de tensão THDV no sistema e o custo dos filtros sintonizados a serem utilizados. O problema se resolve com um procedimento baseado em lógica *fuzzy* e no método de “*Simulated Annealing (SA)*”.

Zobaa (2005) utiliza uma função de custo semelhante à empregada por Hsiao (2001) para a determinação de um único filtro sintonizado para compensar uma carga não linear e ao mesmo tempo garantir um fator de potência superior a 90%. Um detalhe interessante desta abordagem é o uso de um conjunto de restrições para evitar a ressonância da impedância equivalente do sistema para qualquer frequência harmônica presente no espectro da carga não linear. Além disso, Zobaa introduz restrições adicionais para evitar a sobrecarga do capacitor do filtro por sobretensão no valor eficaz e no valor de pico. O método de otimização utilizado neste caso é o de “*Golden Section Search (SSG)*”.

Zobaa (2006) publicou uma nova versão de sua abordagem que completa agora as restrições necessárias para evitar a sobrecarga do capacitor por corrente e por potência reativa de acordo aos limites da (IEEE Std 18-1992). Sua nova função de custo a minimizar corresponde ao custo de perdas anuais, mais o custo de investimento do filtro atualizado anualmente considerando N anos de avaliação com uma taxa de juros *i* específica.

Chang (2007) emprega Redes Neurais Sequenciais e Acertos Ortogonais para minimizar a distorção total de corrente TDD e a distorção das tensões nas barras THDV. As perdas no filtro, a compensação de potência reativa e as restrições dos harmônicos individuais são levados em consideração.

Lina Huang (2007) apresenta um enfoque multiobjetivo baseado em: minimizar a THDI no PCC para maximizar a potência reativa total da fundamental e minimizar o custo dos filtros sintonizados. Esta formulação é resolvida com o uso do método de “*Particle Swarm Optimization*” (PSO).

Uma formulação idêntica é considerada por He (2008-2009). Na mesma formulação, são otimizados filtros sintonizados e de segunda ordem tendo em conta casos pessimistas de depreciação dos componentes dos filtros. Utilizam-se restrições especiais para evitar ressonâncias no sistema.

Amavel e Cardoso (2008) tratam o problema de projetar um filtro com potência reativa mínima composta por vários ramos sintonizados.

Rashtchi (2008) formularam o problema, como a minimização do custo total dos filtros sintonizados, os quais são selecionados e localizados em um circuito de distribuição. Aqui é utilizado um Algoritmo Genético Simples (SGA) em que as restrições da THDV máxima e IHDV máxima são incluídas mediante uma função de penalidade.

Ruihua, Yuhong e Yaohua Zhang (2009) tratam de projeto de filtros sintonizados para o quinto e sétimo harmônicos e um filtro de segunda ordem que geram uma potência reativa especificada para o sistema. Novamente a função objetivo utilizada é o custo dos filtros. Para a solução do problema utilizam um SGA.

Chang (2009) determina um conjunto de filtros sintonizados por meio da minimização de seu custo, sujeito a restrições de QEE e saturação dos filtros. Uma parte distintiva deste trabalho consiste nas análises probabilísticas que são empregadas para considerar as variações nas fontes de harmônicos e na impedância do sistema.

Ko (2009) utiliza a formulação de Chang e Wu (2004) com a modificação de adicionar as perdas dos filtros ao problema. A solução é realizada pelo método “PSO” com “*Nonlinear Time-varying Evolution*”.

Sharaf e Adel (2009) apresentam um método, utilizando a técnica de “*Discrete PSO*”, que minimiza uma função composta por vários objetivos: mínima corrente de distorção I_{sh} no sistema, máxima corrente de harmônicos I_{fh} no filtro, mínima tensão harmônica V_h no ponto de conexão do filtro, todos com respeito à corrente harmônica da carga I_h , assim como mínima relação quadrática da corrente do sistema com relação a do filtro. Em uma nova contribuição, Sharaf e Adel, utilizam o método “*Discrete Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)*” para este problema.

Hong e Chiu (2010) utilizando o método do “*Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation*”, apresentam a minimização do custo de um conjunto de filtros sintonizados sujeitos a restrições de distorção máxima, saturação dos filtros e fator de potência desejado.

Vishal Verma e Singh (2010) apresentam uma função objetivo composta para ser otimizada com um SGA. Esta função inclui a minimização da corrente harmônica I_{sh} do sistema, da corrente na frequência fundamental no filtro e a diferença entre a potência reativa desejada à frequência fundamental, Q_{sl} , e a soma de potência reativa gerada pelo filtro.

Maza-Ortega, (2010) e Churio-Barboza (2011) apresentaram um algoritmo para projetar filtros que podem utilizar diferentes tipos de funções objetivo, dentre as quais se encontram: mínima corrente rms no sistema, mínimo THDI dessa corrente, mínimo THDV, combinação linear de THDI e THDV, custo dos filtros etc.

Dehini, Sefiane, Rachid (2011) elaboraram uma função objetivo composta que inclui o custo dos filtros sintonizados e o THDI da corrente no PCC para ser resolvida pela técnica “*Ant Colony Optimization (ACO)*”.

Sanjeev e Bhim Singh (2011) utilizam um algoritmo baseado em PSO para maximizar uma função objetivo que compreende a média do fator de potência F_{Pk} e a redução do THDI_k

para um conjunto de M níveis de carga diferentes. A otimização é realizada para filtros sintonizados e de segunda ordem.

Hao Yue (2011) apresenta uma aplicação do NSGA-II ao problema dos filtros de harmônicos. A formulação utilizada inclui a minimização do custo dos filtros e das perdas na rede. Este trabalho considera tanto filtros passivos sintonizados como filtros ativos, mas não seleciona o número de filtros a utilizar. Por outro lado, a otimização se realiza para um único cenário de carga, o que não corresponde fielmente com os casos reais.

Em Ravikumar (2012) é apresentada a otimização dos filtros sintonizados e de segunda ordem com o propósito de minimizar o máximo THDV das barras do sistema. Este trabalho usa o método de “PSO” para resolver o problema.

Ertay (2012) utiliza o método de SA como otimizador da função objetivo para minimizar a soma das correntes harmônicas no PCC.

Shengqing Li (2012) aplica o método de “*Multi-island* PSO” para otimizar uma formulação com quatro objetivos diferentes: maximizar a potência reativa à frequência fundamental, assim como minimizar o THDI, o THDV e o custo dos filtros.

Finalmente, Junpeng Ji (2012) apresenta outra aplicação do método de PSO para resolver uma formulação multiobjetivo composta por três funções a minimizar: o custo dos filtros, a perda de potência reativa em relação à frequência fundamental e a soma ponderada das distorções totais de tensão e corrente.

1.6 Estrutura da tese

O **Capítulo 1** apresenta a introdução ao trabalho, que compreende sua motivação, objetivos e inovação tecnológica. Além disso, realiza-se uma análise crítica do estado da arte sobre o problema apresentado.

No **Capítulo 2**, discutem-se aspectos relacionados com os métodos para realizar a CPR em Sistemas Elétricos de Distribuição contaminados com harmônicos mediante o uso de bancos de capacitores e filtros de harmônicos e são tratados critérios para a seleção de capacidade e de localização.

No **Capítulo 3**, realiza-se uma análise das normas brasileiras sobre QEE e é desenvolvido o tema da análise de harmônicos nos circuitos de distribuição primária.

No **Capítulo 4**, é exposto o novo método desenvolvido, o que compreende a definição de funções objetivo, variáveis e restrições para a formulação do problema de otimização de

CPR em sistemas de distribuição contaminados por harmônicos. Além disso, analisa-se o algoritmo de otimização selecionado e seu uso para o problema tratado.

No **Capítulo 5**, apresenta-se uma aplicação das ferramentas desenvolvidas à solução de casos práticos.

Finalmente, no Capítulo 6, apresentam-se as conclusões da tese e as recomendações para possíveis trabalhos futuros sobre o tema.

CAPÍTULO II

COMPENSAÇÃO DA POTÊNCIA REATIVA

2.1 Introdução

Uma grande parte dos equipamentos industriais consome potência reativa em sua operação normal. Os motores elétricos compõem (60-65%) das cargas industriais, os transformadores (29-25%), as linhas aéreas, reatores, conversores e outros equipamentos consomem o restante (10-20%) da potência reativa total de carga do sistema, que pode chegar a ser comparável ou ainda maior que a potência ativa em determinados tipos de equipamentos.

Uma instalação industrial pode ter um FP relativamente baixo, situando-se entre 0.6 e 0.8. Este FP se deve à presença de motores de indução com baixa carga, o uso de conversores eletrônicos, a utilização de dispositivos de indução, de unidades de climatização e o emprego de iluminação de descarga. Na medida em que a planta está mais motorizada, pode-se esperar uma queda no FP a menos que se tomem medidas corretivas.

A CPR nos sistemas elétricos de distribuição consiste na seleção e instalação de bancos de capacitores em certos pontos do circuito com o objetivo de reduzir seus custos de operação anuais.

Sob condições atuais, em que são cada vez mais utilizadas as cargas com comportamento não linear, é necessário considerar a distorção provocada pelos harmônicos destas cargas e o possível aparecimento de ressonâncias entre os elementos indutivos do sistema e os bancos de capacitores existentes.

Da mesma forma, em um circuito que contém harmônico, a opção mais econômica em localização e seleção de capacitores que consideram somente os resultados para frequência fundamental, pode aumentar os índices de distorção e então ser inviáveis do ponto de vista da QEE.

Outro tipo de CPR mais apropriada na presença de harmônico são os filtros passivos, que unem à ação de filtragem com a função de injeção da potência reativa às redes.

2.2 Fator de potência

Em termos de potências, o FP é a relação entre a potência ativa $P(kW)$ que produz trabalho na carga e a potência aparente do circuito $S(kVA)$ conforme (2.1).

$$\hat{f}p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{3}VI} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \cos(\tan^{-1}(Q/P)) \quad (2.1)$$

Essa é a expressão do FP instantâneo em um dado instante. Entretanto, considerando a variabilidade da carga elétrica no tempo, costuma-se calcular o Fator de Potência Médio (FPm) de um consumidor a partir de relação entre a energia ativa Ea (kWh) e a energia reativa Er (kVarh) fornecidas à carga de acordo com (2.2).

$$\hat{f}p_M = \frac{Ea}{\sqrt{Ea^2 + Er^2}} = \cos(\tan^{-1}(Er/Ea)) \quad (2.2)$$

O FP_m é o que constantemente é empregado pelas empresas distribuidoras de energia elétrica para faturar a energia reativa excedente que se fornece a uma dada empresa industrial (PROCEL, 2011).

O aumento do FP ou a CPR em sistemas de distribuição de energia elétrica tem várias vantagens técnicas e econômicas nestes sistemas, tais como:

- 1) Redução das contas de energia elétrica de consumidores industriais ou de serviços;
- 2) Aumento da capacidade do sistema;
- 3) Redução de perdas de potência e de energia para o sistema;
- 4) Melhoria das condições de tensão do sistema.

2.2.1 Redução das contas de energia elétrica

O custo da energia consumida em uma instalação industrial em um período de tempo dado depende de vários fatores como, a demanda máxima contratada ou registrada, a energia consumida no período analisado e a distribuição desse consumo pelos diferentes horários do dia, as possíveis penalizações por excesso de demanda ou por um FP menor que o estabelecido em norma, entre outros. O manual da Tarifação de Energia Elétrica do PROCEL (PROCEL 2011) define vários tipos de tarifas a serem utilizados no faturamento de energia elétrica e define os conceitos de Demanda Reativa Excedente DREX e de Energia Reativa Excedente EREX, magnitudes que são calculadas como a demanda e a energia reativa que excedem os valores da demanda e energia reativas correspondentes a um FP igual a 0.92.

Desta forma, se o FP registrado é inferior a 0.92, produz-se um incremento importante no total de faturamento devido ao pagamento da DREX e a EREX. Por outro lado, se for incrementado o FP por meio do uso de bancos de capacitores obterão importantes benefícios econômicos para a instalação.

2.2.2 Aumento da capacidade do sistema

Em muitas concessionárias de energia elétrica, geradores, transformadores, condutores, seccionadores, fusíveis, interruptores automáticos, etc. são dimensionados a partir de uma capacidade de corrente ou de potência aparente S (kVA) em regime permanente que seja suficiente para alimentar a carga. Quando os capacitores estão operando, eles fornecem os requisitos de potência reativa da carga e reduzem a corrente circulante da fonte até o ponto de localização dos compensadores de acordo com (2.3).

$$S = \sqrt{P^2 + (Q - Q_c)^2} \quad (2.3)$$

Menos corrente significa menor carga em S (kVA) para geradores, transformadores, cabos etc. Portanto, os capacitores podem ser utilizados para reduzir a sobrecarga dos circuitos ou, se estes não estão sobrecarregados, permitem o incremento da sua capacidade de carga.

2.2.3 Redução de perdas de potência e de energia para o sistema

As perdas de energia em um sistema de distribuição representam entre 5 – 15% da energia consumida pelas cargas. Isto depende da variabilidade das cargas, a bitola e comprimento dos circuitos etc. Em uma seção de circuito de resistência R , as perdas de potência ΔP podem ser decompostas em uma parte devida à potência ativa P e outra devida à potência reativa Q . Os capacitores só podem reduzir a parte das perdas devida à circulação da potência reativa ΔP_q conforme (2.4).

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{V^2} R = \left(\frac{P}{V}\right)^2 R + \left(\frac{Q}{V}\right)^2 R = \Delta P_p + \Delta P_q \quad (2.4)$$

As perdas variam ao compensar a potência reativa com um capacitor de magnitude Q_c como representado em (2.5):

$$\Delta P_2 = \frac{P^2 + (Q - Q_c)^2}{V^2} R \quad (2.5)$$

A economia de perdas depende de (2.6):

$$\Delta P_1 - \Delta P_2 = \left(\frac{P^2 + Q^2}{V^2} - \frac{P^2 + (Q - Q_c)^2}{V^2} \right) R = \frac{Q_c(2Q - Q_c)}{V^2} R \quad (2.6)$$

O efeito que produz um capacitor sobre as perdas depende de sua localização no circuito, razão por que um aspecto para considerar é a localização destes capacitores na rede

elétrica. Uma das primeiras análises do problema da localização dos capacitores nos circuitos radiais de distribuição pode ser visto em (COOK, 1959-60). Este autor considerou um circuito radial de comprimento L , com carga reativa total Q_{TOT} distribuída uniformemente ao longo do alimentador como mostra a figura 2.1.

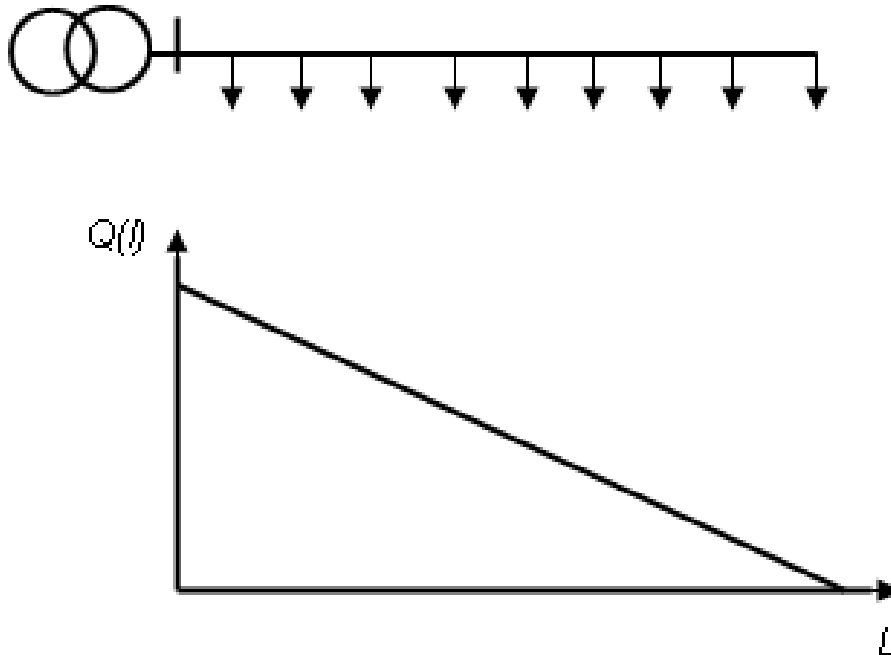


Figura 2.1- Circuito radial com carga reativa distribuída uniformemente

Fonte: Cook (1959-60)

A equação da distribuição da potência reativa ao longo do circuito é representada em (2.7):

$$Q(l) = Q_{TOT} - \left(\frac{Q_{TOT}}{L} \right) l \quad (2.7)$$

Sob estas condições, um capacitor de potência Q_c que está conectado em um nó cuja distância a partir da Subestação é l_c , apresenta uma nova distribuição da potência reativa, como é mostrada na figura 2.2.

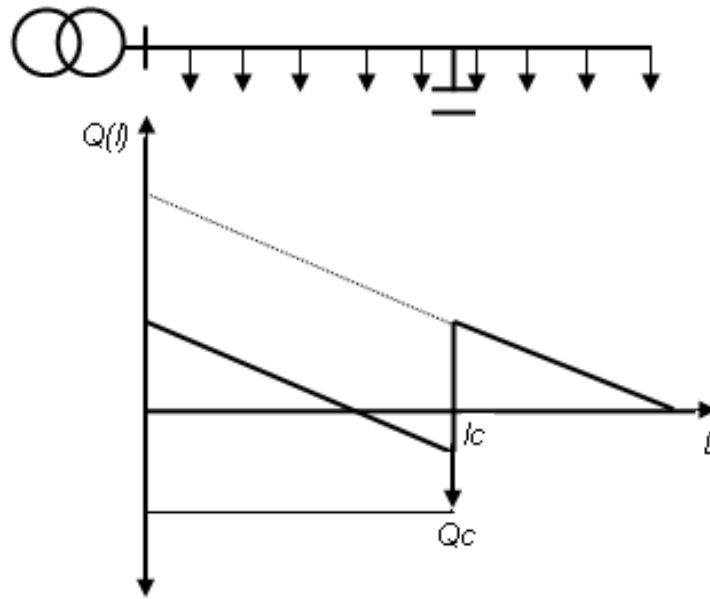


Figura 2. 1 - Circuito radial com carga reativa e um banco de capacitores.

Dessa forma, o capacitor afetará a magnitude da carga reativa a partir da sua localização (l_c) até a fonte, obtendo-se nas expressões (2.8) a potência reativa no circuito, para qualquer localização (l).

$$Q(l) = \begin{cases} Q_{TOT} - \left(\frac{Q_{TOT}}{L}\right)l - Q_c & \text{para } (l \leq l_c) \\ Q_{TOT} - \left(\frac{Q_{TOT}}{L}\right)l & \text{para } (l > l_c) \end{cases} \quad (2.8)$$

Considerando que a resistência R do condutor é proporcional ao seu comprimento, as perdas de potência ativa provocadas pela carga reativa do circuito são obtidas como em (2.9):

$$\Delta P = \frac{R/L}{V^2} \left[\int_0^{l_c} \left(Q_{TOT} - \left(\frac{Q_{TOT}}{L}\right)l - Q_c \right)^2 dl + \int_{l_c}^L \left(Q_{TOT} - \left(\frac{Q_{TOT}}{L}\right)l \right)^2 dl \right] = \frac{R}{3V^2L^2} \left[3l_c^2 Q_{TOT} Q_c - 3l_c L Q_c (2Q_{TOT} - Q_c) + L^2 Q_{TOT}^2 \right] \quad (2.9)$$

Minimizando as perdas de potência com respeito à localização do capacitor, é obtido que a melhor localização (l_c) é dada em (2.10):

$$l_c = \frac{L(Q_{TOT} - \frac{1}{2}Q_c)}{Q_{TOT}} \quad (2.10)$$

Para um circuito com carga reativa e resistências uniformemente distribuídas, o autor demonstrou que os melhores resultados são obtidos com um capacitor de potência $2/3Q_{TOT}$ a

uma distância $2/3L$ da fonte, o que é conhecido como a "lei dos dois terços". Porém, sob as reais condições dos circuitos, esta condição não é completamente atendida (COOK, 1959-60).

No caso geral em que se conectam um conjunto de bancos de capacitores em diferentes pontos do sistema elétrico, a economia nas perdas depende do efeito de todos os bancos e não se pode separar por cada um deles.

2.2.4 Melhoria das condições de tensão do sistema

A queda de tensão em um elemento série com impedância $R+jX$, pode ser expressa de forma aproximada pela expressão (2.11):

$$\Delta V \approx \frac{RP + XQ}{V} \quad (2.11)$$

Portanto, uma variação da potência reativa da carga, pela inserção da potência reativa Q_c , repercute em uma diminuição da queda de tensão como mostra (2.12).

$$\Delta V_2 \approx \frac{RP + X(Q - Q_c)}{V} = \Delta V_1 - \frac{X Q_c}{V} \quad (2.12)$$

Considerando novamente um circuito radial com carga uniformemente distribuída, o incremento da tensão ao longo do circuito (ΔV_c) pode ser representado como é visto na figura 2.3.

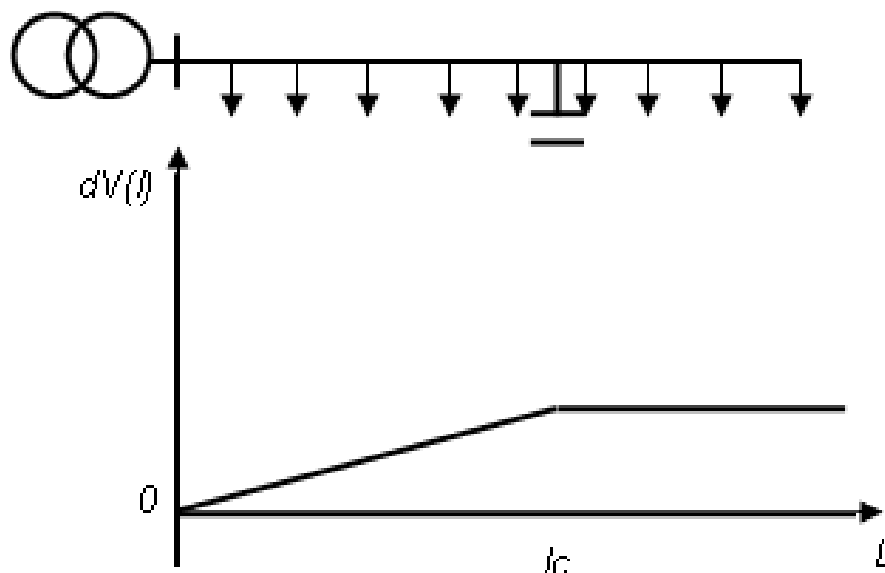


Figura 2. 2 - Incremento da tensão ao longo do circuito.

Se a reatância X é proporcional ao comprimento, o incremento de tensão é dado como em (2.13):

$$\Delta V_c(l) = \begin{cases} \frac{X \cdot Q_c}{V} \left(\frac{l}{L} \right) & \text{para } (l \leq l_c) \\ \frac{X \cdot Q_c}{V} \left(\frac{l_c}{L} \right) & \text{para } (l > l_c) \end{cases} \quad (2.13)$$

Desta forma, a conexão de bancos de capacitores ao circuito, incrementa os níveis de tensão nas barras, e dessa forma pode minimizar problemas de baixa tensão nos circuitos. Por outro lado, sempre se deve verificar, com a instalação do banco de capacitores, que a tensão não cresça excessivamente.

2.3 Saturação dos capacitores

A norma IEEE Std 18-2002 (IEEE Std 18-2002, 2003) estabelece que os capacitores de potência devam ser capazes de operar em regime contínuo sob qualquer condição do sistema desde que se cumpram as condições seguintes:

- 1) A tensão *rms* aplicada ao capacitor não supere a 110% da sua tensão nominal *rms*;
- 2) A tensão de pico aplicada ao capacitor (incluindo harmônicos, mas não transitórios) não ultrapasse a 120% da sua tensão de pico nominal;
- 3) A corrente *rms* que flui pelo capacitor não supere a 135% da sua corrente nominal *rms*;
- 4) A potência reativa gerada pelo capacitor não supere a 135% da sua potência reativa nominal.

No entanto esses limites podem ser violados em uma instalação industrial, por exemplo, se ocorrerem as duas seguintes condições: tensão à frequência fundamental excessivamente alta; ou a ocorrência de excessiva distorção harmônica.

2.4 Harmônicos e capacitores

Os sistemas elétricos modernos contêm uma grande quantidade de fontes poluentes ou produtoras de harmônicos, em que, se destacam fundamentalmente as cargas não lineares empregadas nas indústrias e nas instalações comerciais e residenciais.

Os harmônicos e inter-harmônicos produzem efeitos tanto nos próprios sistemas elétricos de potência e nas cargas elétricas conectadas a estes, como nos sistemas de comunicações.

Todos os efeitos dos harmônicos nos sistemas de potência são prejudiciais e entre eles podem ser citados:

- 1) A possível existência de ressonâncias série e paralelo que contribuem para a amplificação dos harmônicos e seus efeitos;
- 2) A redução da eficiência no sistema pelo incremento das perdas nos sistemas de geração, transmissão e distribuição da energia;
- 3) O envelhecimento prematuro do isolamento dos componentes da rede elétrica e como consequência a redução de sua vida útil;
- 4) O mau funcionamento do sistema ou de alguns de seus componentes.

2.4.1 Ressonâncias

A maioria dos elementos existentes nos sistemas elétricos, como transformadores, máquinas rotativas, entre outros, têm caráter indutivo. Não obstante a presença de bancos de capacitores para compensar o FP, eles podem também interagir com os elementos indutivos do circuito de forma que a determinadas frequências, se igualam as reatâncias indutivas e capacitivas equivalentes provocando uma condição de ressonância em que podem aparecer altos valores de tensão e corrente que afetam o funcionamento correto do sistema e podem produzir problemas nos equipamentos. Na figura 2.4 é ilustrado um arranjo típico de sistemas elétricos, evidenciando os efeitos indutivos e capacitivos distribuídos.

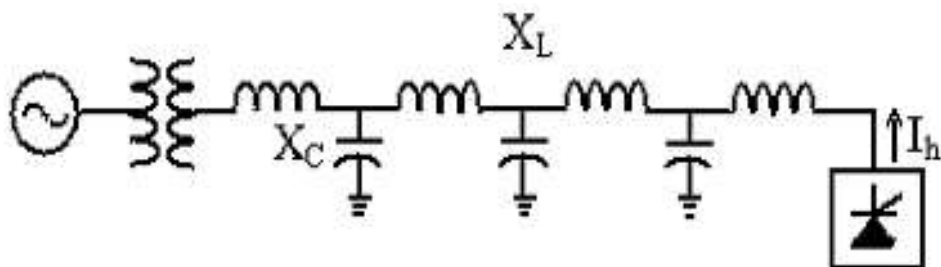


Figura 2. 3 - Indutâncias, capacitâncias e fontes de harmônicos.

A presença de indutâncias e capacitâncias no circuito elétrico propicia a existência de múltiplas frequências de ressonância.

Quando um harmônico de tensão ou corrente se aproxima de alguma frequência, produz-se uma grande amplificação do mesmo com a conseguinte extensão do problema à rede e aos equipamentos conectados a ela.

2.4.1.1 Ressonância série

A ressonância série acontece quando se igualam as reatâncias indutiva e capacitiva em um circuito serie RLC como o mostrado na figura 2.5.

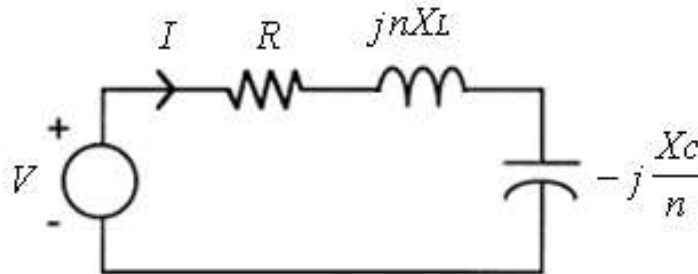


Figura 2. 4 - Ressonância série.

A impedância equivalente do circuito vista da fonte está representada na equação (2.14):

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = R + j\left(nX_L - \frac{X_C}{n}\right) \quad (2.14)$$

A variação desta impedância com a frequência mostra que existe um mínimo de impedância, a qual ocorre na frequência de ressonância, na qual se igualam a reatância indutiva e capacitiva ($X_L = X_C$), como é visto na figura 2.6.

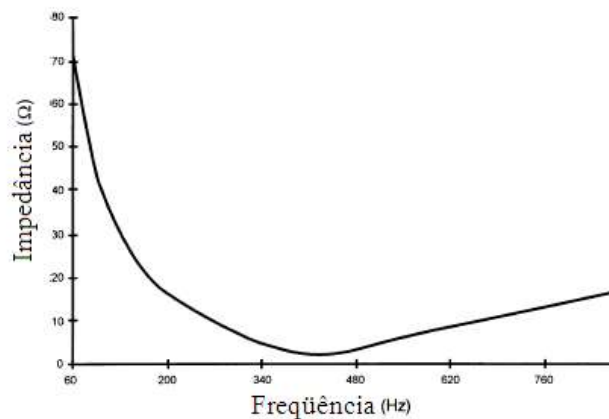


Figura 2. 5 - Impedância versus Frequência em um circuito com ressonância série.

Desta forma, a frequência de ressonância é calculada por (2.15):

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.15)$$

A ordem do harmônico no qual se produz a ressonância é dada pela expressão (2.16):

$$n_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (2.16)$$

A corrente que flui no circuito pode ser calculada pela expressão (2.17):

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{V}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} \quad (2.17)$$

À frequência de ressonância, esta corrente é muito elevada já que ela é limitada somente pela resistência do circuito. Além disso, esta alta corrente produz elevadas quedas de tensão no indutor e no capacitor individualmente.

2.4.2.2 Ressonância paralelo

A ressonância paralelo ocorre quando a impedância equivalente do circuito, vista da fonte, tende a infinito para uma frequência determinada conforme mostra a figura 2.7.

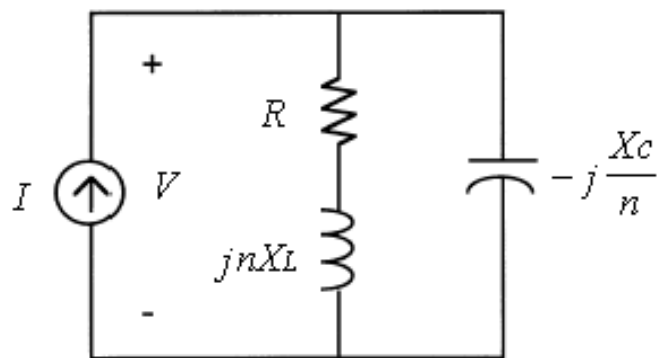


Figura 2. 6 - Ressonância paralelo.

A impedância equivalente do circuito vista da fonte é dada por (2.18):

$$Z = \frac{(R + j\omega L)\left(-j\frac{1}{\omega C}\right)}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} \quad (2.18)$$

O comportamento desta impedância com a frequência é mostrado na figura 2.8, onde se vê que a impedância atinge um valor máximo para a frequência de ressonância.

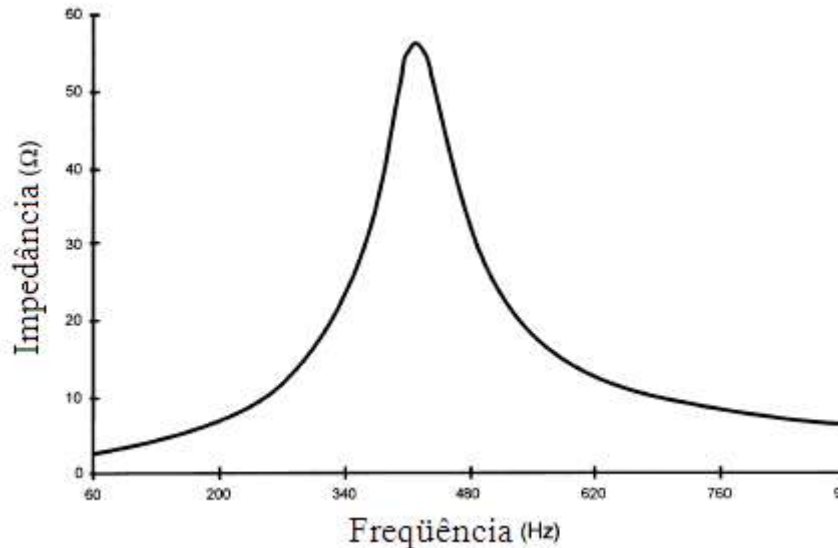


Figura 2. 7 - Impedância versus Frequência em um circuito com ressonância paralelo.

2.5 Filtros harmônicos

Os meios compensadores da distorção harmônica, por excelência, são os filtros de harmônicos, os quais em essência têm como objetivo restringir a circulação das correntes harmônicas pela rede e assim evitar a distorção da tensão nas barras (DUGAN, 2004).

Por seu princípio de operação, os filtros harmônicos podem ser: passivos, ativos ou híbridos (quando se utiliza uma mescla dos primeiros). Apesar de os filtros ativos mostrarem vantagens nos sistemas de baixa tensão, ainda assim, os filtros passivos resultam mais atrativos nos sistemas de média e alta tensão (NASIFF, 2007).

Os filtros de harmônicos passivos podem ser de tipo: série ou paralelo, sendo estes últimos os de maior aplicação prática, com o incentivo adicional, de que os filtros passivos de tipo paralelo são também bons compensadores da potência reativa e podem realizar ambas as funções (filtragem e compensação de potência reativa) em sistemas elétricos industriais na presença de cargas não lineares.

De uma forma geral, um filtro passivo paralelo está composto por um capacitor de potência reativa Q_c e um circuito passivo formado por indutores, resistores e capacitores, cujo objetivo é “curto circuitar” as fontes de correntes harmônicas tão próximo quanto possível da fonte de distorção, ou seja, das cargas não lineares (DUGAN, 2004). Dessa forma, o filtro evita a circulação das correntes harmônicas pelo sistema elétrico como mostra a figura 2.9.

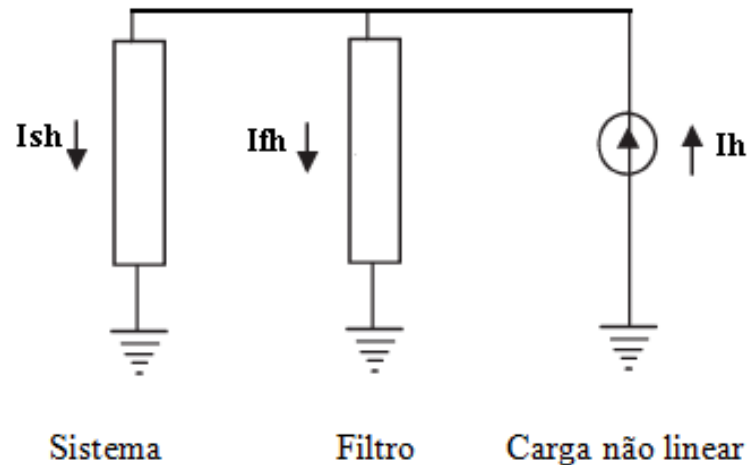


Figura 2. 8 - Efeito do filtro paralelo

Fonte: (LEITE et.al., 2014).

Na prática é impossível haver um curto circuito entre correntes harmônicas (I_h) da carga não linear, e o que se produz como mostra a figura 2.9 é uma divisão desta corrente em: a corrente pelo filtro (I_{fh}) e a corrente pelo sistema (I_{sh}).

Evidentemente, a ação do filtro será melhor quando se reduz mais a corrente (I_{sh}) pelo sistema, o qual redundará em uma redução da tensão harmônica V_h no ponto de conexão do filtro.

Os componentes do filtro são selecionados para que sua impedância seja mínima à frequência de sintonia (n) e com um fator de qualidade (Q) que garanta um bom desempenho do filtro.

Existem diversos tipos de filtros passivos paralelos que podem ser classificados em: filtros sintonizados e filtros amortecidos (ARRILLAGA, 2003; DUGAN, 2004).

2.5.1 Filtros sintonizados

Os filtros sintonizados do tipo apresentado na figura 2.10 são utilizados para eliminar uma só frequência, pois são filtros de sintonia fina, onde o que se controla é o fator de qualidade Q para o qual o filtro é projetado (ARRILLAGA, 2003). Nestes filtros o circuito passivo se compõe de uma indutância em série a uma resistência de valor reduzido.

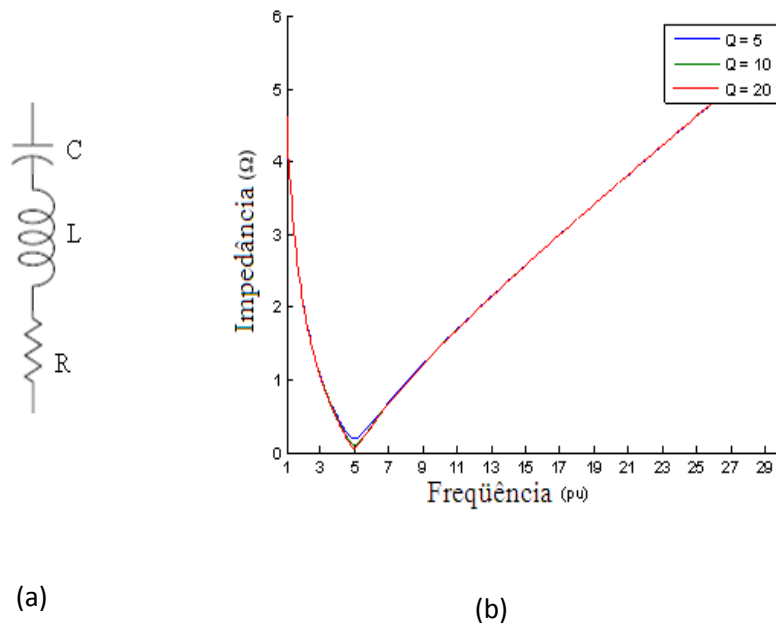


Figura 2. 9 - Filtro sintonizado. a) Circuito, b) Impedância versus frequência.

Estes filtros são utilizados para eliminar harmônicos de baixa ordem com um fator qualidade alta, o qual é determinado em (2.19):

$$Q = n \cdot X_L / R = X_c / (n \cdot R) \quad (2.19)$$

Onde X_L e X_c são respectivamente a reatância indutiva e capacitiva do filtro à frequência fundamental.

A frequência na qual ocorre o mínimo de impedância (frequência de sintonia) corresponde à frequência de ressonância do filtro, dada em (2.20):

$$n = \sqrt{X_c / X_L} \quad (2.20)$$

A seleção do X_L e X_c para um filtro com capacitor de potência reativa Q_c é muito simples e pode ser calculado pelas expressões (2.21) e (2.22):

$$X_c = V_n^2 / Q_c \quad (2.21)$$

$$X_L = X_c / n^2 \quad (2.22)$$

Uma vez determinada a reatância X_L e conhecido o fator de qualidade, a resistência pode ser calculada por (2.23):

$$R = n \cdot X_L / Q \quad (2.23)$$

Como o fator de qualidade é alto (a resistência é muito pequena) a potência reativa gerada pelo filtro a frequência fundamental pode ser calculada de forma aproximada pela expressão (2.24):

$$Q_1 \approx \frac{V_n^2}{X_c - X_l} = \frac{V_n^2}{X_c \cdot (1 - 1/n^2)} = Q_c \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (2.24)$$

Portanto, desejando-se projetar um filtro para fornecer certa potência reativa Q_1 , X_c pode ser determinado pela expressão (2.25):

$$X_c = \frac{V_n^2}{Q_c} \approx \frac{V_n^2}{Q_1} \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (2.25)$$

2.5.1.1 Variação dos parâmetros

Os filtros sintonizados são os mais afetados pelas variações em seus parâmetros devido a sua estreita banda de passagem. Quando se produzem variações ΔL e ΔC na indutância e capacitância do filtro, a nova frequência de ressonância n depende da frequência de sintonia nominal do filtro n_{nom} e é calculada pela expressão (2.26) (IEEE Std. 1531, 2003):

$$n = n_{nom} / \sqrt{(1 + \Delta L)(1 + \Delta C)} \quad (2.26)$$

O efeito da variação da capacitância e da indutância sobre a característica de impedância versus frequência do filtro é idêntico, portanto, a ação combinada de ambas as variações pode provocar uma modificação significativa da frequência de ressonância do filtro.

As variações dos parâmetros L e C do filtro devem-se principalmente as seguintes situações:

- 1) Tolerâncias de fabricação dos componentes;
- 2) Variações da temperatura ambiente;
- 3) Falha de unidades de capacitores.

À frequência inferior da sua frequência de sintonia, o filtro se comporta como um capacitor, podendo provocar uma ressonância com os elementos indutivos da rede (NASIFF, 2007). Portanto, os filtros sintonizados não devem ser projetados para a frequência do harmônico a eliminar h , e sim a uma frequência menor de aproximadamente $0.94h$.

2.5.2 Filtros de segunda ordem

Existem múltiplos tipos de cargas não lineares que produzem espectros característicos de correntes harmônicas de múltiplas frequências. Para este tipo de cargas, os filtros devem ser capazes de “eliminar” não um harmônico em particular, mas vários harmônicos ou uma gama de frequências próximas umas das outras.

Os filtros amortecidos são usados para “eliminar” uma gama de frequências e estes têm uma característica suave de impedância \times frequência cuja forma é também determinada pelo fator de qualidade do filtro.

O filtro amortecido mais empregado na prática é o de segunda ordem, ilustrado na figura 2.11, cujo comportamento depende do fator de qualidade empregado em seu projeto. Um fator de qualidade alto implica uma banda de passagem mais seletiva, enquanto que um fator de qualidade baixo reduz a impedância do filtro para as frequências altas.

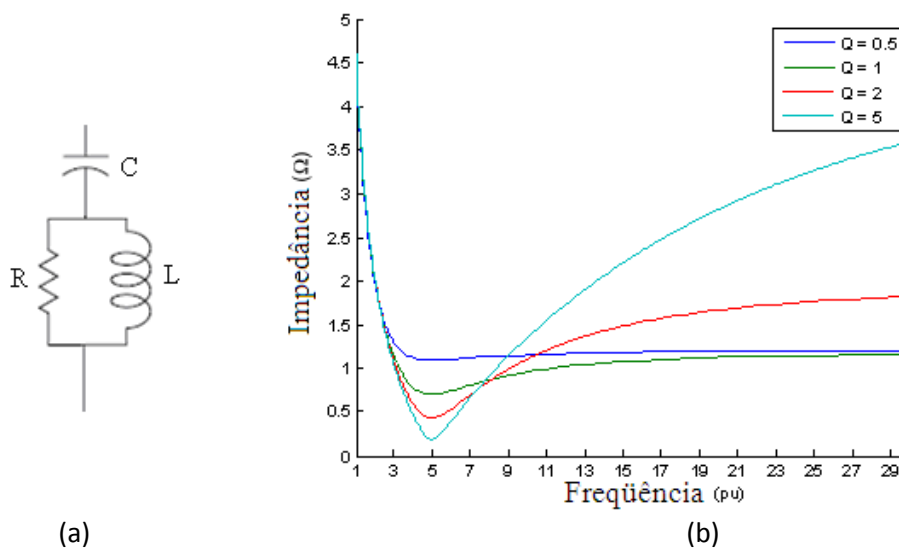


Figura 2. 10 - Filtro de segunda ordem. a) Circuito, b) Impedância versus frequência.

A impedância do filtro de segunda ordem para a frequência n é dada pela expressão (2.27):

$$Z = \frac{R(jX_l \cdot n)}{R + jX_l \cdot n} - jX_c / n \quad (2.27)$$

Para os filtros amortecidos o fator de qualidade é definido pela relação (2.28):

$$Q = n \cdot X_l \cdot R \quad (2.28)$$

Considerando que a frequência para mínima impedância é n , o projeto do filtro a partir da potência Q_c do capacitor é feito de acordo com os passos a seguir:

- 1) Calcula-se X_c a partir de (2.16).
- 2) Determina-se a resistência R a partir da equação (2.29) (ABRIL, 2012):

$$R = X_c / (n \cdot Q) \left(\sqrt{(1 + Q^2)^2 + 1} - 1 \right) \quad (2.29)$$

- 3) Obtém-se X_l utilizando (2.23).

Se por outro lado, o projeto é realizado para que o filtro gere uma potência reativa Q_l , pode-se empregar a expressão aproximada apresentada em (2.30) (ABRIL, 2012).

$$X_c \approx \frac{V_n^2}{Q_l} \frac{1}{1 - \left(\sqrt{(1 + Q^2)^2 + 1} - 1 \right) / (n^2 \cdot Q^2 + 1)} \quad (2.30)$$

2.6 Conclusões

A CPR por meio de bancos de capacitores oferece múltiplas vantagens técnico-econômicas aos sistemas elétricos de distribuição. Não obstante, a obtenção dos benefícios previdentes depende da seleção correta do número, capacidade e localização dos capacitores usados no circuito.

O emprego dos capacitores é assunto das normas que estabelecem os limites de tensão, corrente e potência reativa destes dispositivos. É por isto que não é suficiente selecionar os capacitores necessários para compensar a potência reativa, mas também é necessário analisar em que condições de tensão e de distorção harmônica operarão estes capacitores no circuito.

A presença de bancos de capacitores para compensar o FP pode interagir com os elementos indutivos do circuito de forma que a determinadas frequências se igualem as reatâncias indutivas e capacitivas equivalentes provocando uma condição de ressonância em que podem aparecer altos valores de tensão e corrente que afetam o funcionamento correto do sistema e podem criar problemas nos equipamentos.

Desta maneira, quando se pretende utilizar bancos de capacitores em um circuito contaminado por harmônicos, deve-se avaliar a saturação dos capacitores e evitar o surgimento de ressonâncias, com uma correta seleção dos capacitores e sua localização.

Uma opção que se pode empregar para compensar a potência reativa neste tipo de circuitos é utilizar filtros de harmônicos passivos do tipo paralelo como meios da CPR. Desta forma, pode-se compensá-la com potência reativa e ao mesmo tempo reduzir a distorção harmônica existente no circuito.

CAPÍTULO III

QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

3.1 Introdução

O objetivo fundamental de um sistema de suprimento de energia elétrica é distribuir a energia aos consumidores com a máxima continuidade do serviço e atendendo aos parâmetros de qualidade da energia estabelecidos pelas normas vigentes.

Considera-se como problema da qualidade de energia elétrica (QEE) qualquer tipo de alteração dos parâmetros da tensão, corrente ou a frequência que provoque falhas ou má operação do equipamento (DUGAN, 2004).

Na atualidade observa-se um interesse crescente pelos problemas da qualidade da energia elétrica, o que se justifica pelos seguintes fatores:

- 1) Os modernos equipamentos computadorizados e de eletrônica de potência são mais sensíveis aos problemas de QEE;
- 2) O uso crescente de equipamentos para a economia de energia como os *Adjustable Speed Motor Drives* (ASD) e os bancos de capacitores incrementaram os níveis de harmônicos;
- 3) Crescente interesse das empresas distribuidoras por vender a energia a usuários conscientes do problema;
- 4) As redes atuais contêm um número maior de elementos, por isso o defeito em um componente tem maiores consequências.

Embora normalmente se utilize o termo “Qualidade da Energia” (*Power Quality*), tecnicamente é muito difícil medir a qualidade da potência elétrica servida e desta forma, a “QEE” se traduz como “Qualidade da Tensão”.

Os índices da qualidade da energia estão regulamentados pelos diferentes organismos internacionais como a *International Electrotechnical Commission* (IEC), o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) dos Estados Unidos. No caso do Brasil se aplicam as regulamentações da Agência Nacional da Energia Elétrica (ANEEL).

As diferentes normas estabelecem metodologias para a determinação dos índices da qualidade da energia a partir das medições de tensão, corrente, harmônicos etc. Não obstante, quando se deseja estudar o comportamento futuro de um sistema elétrico cujo estado de

operação vai ser alterado pela compensação da potência reativa, é necessário dispor de um procedimento de cálculo de tais índices de qualidade.

O único modo efetivo de estudar a geração e propagação de harmônicos no sistema elétrico de potência consiste na simulação do sistema a partir do modelo de comportamento dos seus componentes frente às frequências harmônicas.

Usualmente, os estudos de penetração ou propagação de harmônicos se apoiam em modelar o sistema de potência como uma rede linear separada para os diferentes harmônicos, e outra a qual contém um conjunto de cargas não lineares para a qual não se pode desprezar o acoplamento entre os diferentes harmônicos.

Os elementos considerados lineares no sistema elétrico são modelados por circuitos equivalentes passivos que representam seu comportamento para cada uma das frequências harmônicas investigadas.

O único modo efetivo de estudar a geração e propagação de harmônicos no sistema elétrico de potência consiste na simulação do sistema a partir do modelo de comportamento de seus componentes a frequências harmônicas.

3.2 Normas da qualidade da energia elétrica: PRODIST-Módulo 8.

As normas da qualidade da energia elétrica compreendem um conjunto de regulamentos que estabelecem os limites de qualidade que o sistema elétrico deve atender para oferecer um bom serviço aos consumidores. Existem normas internacionais e nacionais para o controle da distorção das formas de ondas de tensão e de corrente. Entre as primeiras, destacam-se: a IEEE Std. 519 – 92 (IEEE 2004) e a IEC 61000-3-6 (IEC/TR, 2008-02). No Brasil, estão vigentes os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 8 (ANEEL-PRODIST, 2010).

Esta norma dedica-se fundamentalmente a examinar os aspectos da Qualidade da Energia referentes às Perturbações de Forma de Onda de Tensão em regime permanente ou transitório.

Alguns aspectos relevantes do PRODIST Módulo 8 podem ser destacados, como:

1) Conformidade de tensão em regime permanente:

São estabelecidos os limites adequado, precário e crítico para os níveis de tensão em regime permanente, os indicadores de qualidade, os critérios de medição e registros, prazos

para regularização e de compensação ao consumidor caso os limites para o atendimento adequado não sejam obedecidos;

2) *Fator de Potência:*

São reavaliados os conceitos atuais utilizados para calcular o FP e determinação de energia excedente a ser paga pelo consumidor quando ocorrer transgressão dos limites mínimos estabelecidos. São incorporados os conceitos relacionados ao aumento da energia reativa devido às cargas chaveadas e aos harmônicos;

3) *Distorções na Forma de Onda: Harmônicos:*

É definido como fenômeno, apresentada a nomenclatura para os índices de conformidade relativas às distorções harmônicas, com estabelecimento de propostas para metodologia de medição, protocolos e instrumentos de medições.

4) *Desequilíbrio de Tensão:*

É definido como fenômeno, apresentada a nomenclatura, a forma de cálculo de dois índices de conformidade com propostas de metodologia de medição, e a instrumentação.

5) *Flutuação do Tensão – Flicker:*

São definidos o fenômeno, o indicador, a metodologia de medição e a instrumentação.

6) *Variações do Tensão de Curta Duração:*

São definidas as variações de tensão momentâneas e temporárias, classificando os fenômenos quanto a duração da variação e a amplitude em relação a tensão de referência, a metodologia de medição e a instrumentação.

Tendo em vista os objetivos da presente pesquisa, somente serão considerados em maiores detalhes aqueles fenômenos que são afetados diretamente pela CPR nos sistemas elétricos de distribuição das empresas distribuidoras da energia elétrica, ou seja, a conformidade da tensão em regime permanente e as distorções da forma de onda. Os aspectos relacionados com o fator de potência não serão diretamente tratados, pois estão mais relacionados ao faturamento da energia dos consumidores industriais e comerciais.

3.2.1 Conformidade de tensão em regime permanente

A conformidade de tensão em regime permanente é estabelecida a partir do atendimento de limites máximos e mínimos para a tensão em regime permanente com respeito à tensão contratada nos pontos de entrega. A norma define três classificações para avaliar este atendimento: tensão de atendimento adequada, precária, e crítica, conforme apresentada na tabela 3.1.

Tabela 3. 1 - Limites de variação da tensão (V) em por cento da tensão contratada.

Tensão Nominal	Tensão de Atendimento	Faixa de Variação
≥ 230 kV	Adequada	$95\% \leq V \leq 105\%$
	Precária	$93\% \leq V < 95\%$ ou $105\% < V \leq 107\%$
	Crítica	$V < 93\%$ ou $V > 107\%$
≥ 69 kV	Adequada	$95\% \leq V \leq 103\%$
	Precária	$90\% \leq V < 95\%$ ou $103\% < V \leq 105\%$
	Crítica	$V < 90\%$ ou $V > 105\%$
≥ 1 kV	Adequada	$93\% \leq V \leq 105\%$
	Precária	$90\% \leq V < 93\%$
	Crítica	$V < 90\%$ ou $V > 105\%$

Fonte: ANEEL – PRODIST – Módulo 8, (2012).

De acordo com as normas, espera-se que a tensão nos pontos de entrega esteja entre os limites correspondentes à classificação de adequada, por isso, qualquer tipo de ação sobre a rede ou as cargas e em particular a instalação de equipamentos compensadores da potência reativa, deve ter presente esta restrição de operação do sistema.

3.2.2 Distorções na Forma de Onda: Harmônicos

As distorções harmônicas presentes nas redes elétricas constituem-se em fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes. Estas perturbações tendem a se intensificar à medida que equipamentos e dispositivos consumidores residenciais, comerciais e industriais, utilizando componentes físicos não lineares, têm sido cada vez mais empregados. Este é o caso da tecnologia do emprego da eletrônica e outras, a exemplo do emprego de equipamentos baseados na saturação magnética e arcos elétricos (PRODIST - MÓDULO-8, 2012).

A tabela 3.2 sintetiza a terminologia aplicável às formulações do cálculo de valores de referência para as distorções harmônicas.

Tabela 3. 2 - Terminologia

Símbolo	Identificação da Grandeza
$DIT_h\%$	Distorção harmônica individual de tensão de ordem h
$DTT\%$	Distorção harmônica total de tensão
V_h	Tensão harmônica de ordem h
H	Ordem harmônica
$H_{máx}$	Ordem harmônica máxima
H_{min}	Ordem harmônica mínima
V_1	Tensão fundamental medida

Fonte: ANEEL – PRODIST – Módulo 8, (2012).

As expressões para o cálculo das grandezas $DTT\%$ e $DIT_h\%$ são iguais às definidas pelas normas IEC 61000-3-6 e IEEE Std. 519 para o $THD\%$ e $IHD_h\%$ respectivamente.

1) Distorção Harmônica Total de Tensão ($DTT\%$). Calcula-se como a relação entre a tensão *rms* dos harmônicos superiores considerados e a tensão fundamental (V_1), apresentado em (3.1).

$$DTT\% = THD\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} 100 \quad (3.1)$$

2) Distorção Harmônica Individual de tensão de ordem h ($DIT_h\%$). Calcula-se como a relação entre a tensão de um harmônico individual (V_h) e a tensão fundamental de acordo com (3.2).

$$DIT_h\% = IHD_h\% = \frac{V_h}{V_1} 100 \quad (3.2)$$

Os valores de referência para as distorções harmônicas totais estão indicados na tabela 3.3. Estes valores servem para referência do planejamento elétrico em termos da qualidade da energia e que, regulatoriamente, são estabelecidos em resolução específica, pelos agentes reguladores.

Tabela 3. 3 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais

Tensão nominal do Barramento	Distorção harmônica total de tensão DTT(%)
$V_n \leq 1 \text{ kV}$	10
$1 \text{ kV} < V_n \leq 13.8 \text{ kV}$	8
$13.8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	6
$69 \text{ kV} < V_n \leq 230 \text{ kV}$	3

Fonte: ANEEL Prodíst-Modulo 8, (2012).

Por outro lado, devem ser obedecidos também os valores das distorções harmônicas individuais indicadas na Tabela 3.4. Com respeito à metodologia de aplicação da norma, as medições utilizadas devem ser adquiridas em intervalo mínimo de uma semana, que compreenda o período de operação onde se espera os maiores níveis de emissão de harmônicos. Além disso, o espectro harmônico a ser considerado para fins do cálculo da distorção total deve compreender uma faixa de frequências que considere desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25ª ordem harmônica ($h_{max} = 25$).

Tabela 3. 4 - Níveis de referência para distorções harmônicas individual de tensão (em porcentagem da tensão fundamental)

Harmônico	Ordem	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]			
		$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13.8 \text{ kV}$	$13.8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n \leq 230 \text{ kV}$
Ímpares não múltiplas de 3	5	7.5	6	4.5	2.5
	7	6.5	5	4	2
	11	4.5	3.5	3	1.5
	13	4	3	3	1.5
	17	2.5	2	1.5	1
	19	2	1.5	1.5	1
	23	2	1.5	1.5	1
	25	2	1.5	1.5	1
>25	1.5	1	1	0.5	
Ímpares múltiplas de 3	3	6.5	5	4	2
	9	2	1.5	1.5	1
	15	1	0.5	0.5	0.5
	21	1	0.5	0.5	0.5
	>21	1	0.5	0.5	0.5
Pares	2	2.5	2	1.5	1
	4	1.5	1	1	0.5
	6	1	0.5	0.5	0.5
	8	1	0.5	0.5	0.5
	10	1	0.5	0.5	0.5
	12	1	0.5	0.5	0.5
	>12	1	0.5	0.5	0.5

Fonte: ANEEL/PRODÍST-Modulo 8, (2010).

Por outra parte, a norma IEC 61000-3-6 de compatibilidade eletromagnética recomenda que para os fins de planejamento deve-se levar em consideração:

1) A tensão máxima não superada em 95% dos registros efetuados em uma semana (cada registro é o valor rms das medições em períodos de 10 minutos);

2) A tensão máxima não superada em 99% dos registros efetuados em um dia (cada registro é o valor rms das medições em períodos de 3 segundos).

A norma (IEEE 519-92, 2004) subescreve os conceitos da IEC 61000 (2004) para a avaliação dos limites de harmônicos através dos valores que não sejam excedidos em 95% ou 99% das medições.

Além disso, a IEC 61000-3-6 enfatiza a necessidade de examinar as condições possíveis de operação do sistema e/ou da carga, que podem provocar a aparição de harmônicos não característicos tais como:

1) Redução prolongada ou frequente do número de pulsos dos conversores de 12 pulsos;

2) Desequilíbrio de tensão da fonte de alimentação (normalmente considera-se um desequilíbrio de 1 a 2%, embora possa atingir acima de 3% em determinados casos), DUGAN, (2004);

3) Desequilíbrio entre as impedâncias dos transformadores de conversores de 12 pulsos ou entre as reatâncias de comutação dos conversores;

4) Assimetrias entre os ângulos de disparo das diferentes válvulas dos conversores, e;

5) Dessintonização dos filtros passivos por:

a. Variações da frequência de alimentação;

b. Tolerâncias de fabricação dos componentes e variação dos parâmetros com a temperatura;

c. Envelhecimento dos componentes e;

d. Operações de conexão e desconexão dos filtros passivos e bancos de capacitores para responder às variações da carga.

3.3 Análise de harmônicos

Para avaliar o atendimento aos limites de harmônicos que circulam na rede elétrica, é necessário contar com um método que permita calcular as tensões harmônicas nas barras para qualquer cenário, antes e depois de serem instalados os equipamentos compensadores da potência reativa.

Existem diversos métodos para a análise da propagação de harmônicos em uma rede elétrica, os quais variam quanto aos dados requeridos e a precisão obtida com a simulação, e dentre esses métodos pode-se citar (TASK FORCE ON HARMONICS MODELING AND SIMULATION, 1996):

- 1) Método com fontes de corrente constante (programa de penetração);
- 2) Método com fontes de corrente dependentes;
- 3) Método de fluxo de carga de harmônico (*Newton-Raphson*).

De forma geral, todos estes métodos pretendem determinar a propagação das correntes harmônicas pela rede elétrica e calcular as tensões em todas as frequências harmônicas em todas as barras do sistema conforme mostra a figura 3.1 (LEITE, 2013).

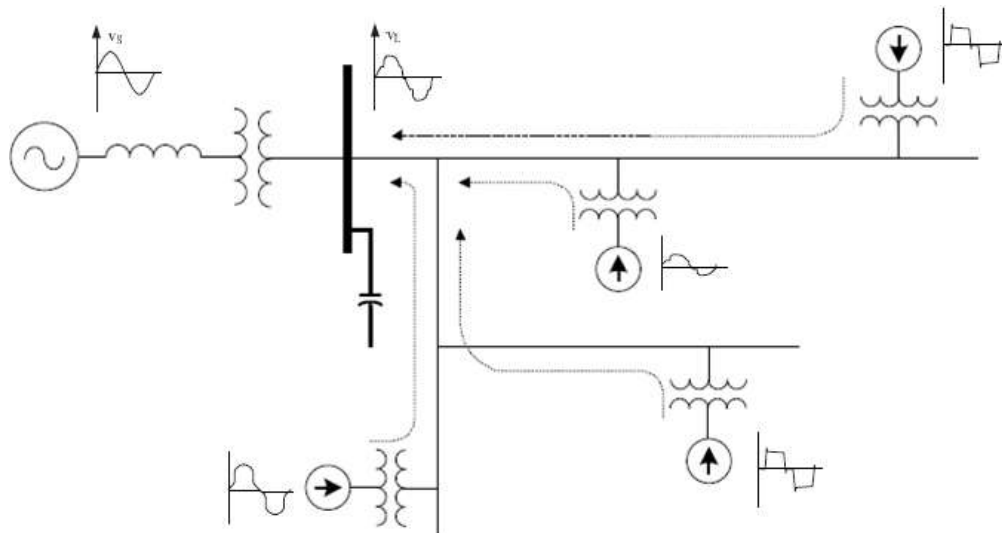


Figura 3. 1 - Propagação de harmônicos pela rede.

Fonte: (DUGAN, 2004 e LEITE, 2013).

O método com fontes de corrente constante representa as injeções de correntes das cargas por fontes de corrente que se calculam a partir dos resultados de um fluxo de potência a frequência fundamental que se executa previamente. O cálculo destas correntes realiza-se a

partir de padrões ou espectros conhecidos para os diferentes tipos de cargas não lineares que se encontram na indústria.

Esta aproximação é muito efetiva para a análise de sistemas contaminados por cargas com componentes de eletrônica de potência, e ao mesmo tempo tem como vantagem a menor complexidade do modelo e dos dados necessários.

A principal desvantagem deste método consiste precisamente no uso de espectros típicos de harmônicos. Isto conduz a um modelo não adequado para a análise de casos que envolvem condições não típicas de comportamento da rede, como a carga parcial dos elementos produtores de harmônicos, a distorção excessiva das tensões harmônicas e as condições de assimetria da rede. Além disso, existem determinados equipamentos/dispositivos com relação $v-i$ não linear cuja dependência com a tensão é tão específica que não apresentam espectros típicos de harmônicos.

O método com fontes de corrente dependentes representa as correntes harmônicas geradas pelas cargas como fontes de corrente dependentes da tensão em cada barra, assim como, dos parâmetros de cada carga com o ângulo de disparo ou carga dos conversores.

Os valores iniciais destas fontes são calculados a partir de um cálculo de fluxo de potência a frequência fundamental e depois calcula-se novamente na medida em que se sucedem as iterações com valores mais precisos das tensões harmônicas em cada ponto.

Uma das vantagens desta aproximação é a independência ou separação no cálculo das fontes de corrente de cada carga com respeito às outras, o que simplifica a tarefa de cálculo.

Este método demonstrou um comportamento adequado quanto à convergência em muitos casos, embora se reporte dificuldades em casos em que existem ressonâncias muito pronunciadas. O método de *Newton-Raphson* permite resolver o sistema de equações da rede e dos dispositivos geradores de distorção em um só sistema de equações não lineares com a ajuda do método. Em teoria a convergência deste método é a melhor, se a partir de uma boa aproximação inicial, mas envolve um maior volume de cálculos a serem realizados.

3.3.1 Fluxo de harmônicos

Um dos métodos mais utilizados para determinar o fluxo de harmônicos é o da injeção de corrente ou método de penetração de harmônicos. Este método é simples de implementar e dá bons resultados para os casos mais frequentes.

Neste método, a corrente do harmônico h da barra k e seu ângulo são obtidos, conhecido o espectro de harmônicos da carga e a corrente consumida pela mesma a

frequência fundamental, como em (3.2) e (3.3) (TASK FORCE ON HARMONICS MODELING AND SIMULATION, 1996):

$$I_{h,k} = I_{1,k} \frac{I_{h,k}(\text{espectro})}{I_{1,k}(\text{espectro})} \quad (3.3)$$

$$\phi_{h,k} = \phi_{h,k}(\text{espectro}) + h(\phi_{1,k} - \phi_{1,k}(\text{espectro})) \quad (3.4)$$

As desvantagens fundamentais que se assinalam a este método podem diminuir, estabelecendo diferentes espectros de harmônicos típicos para os possíveis estados de operação da rede e/ou as cargas não lineares, quer dizer: carga parcial dos elementos produtores de harmônicos, condições de assimetria na rede ou nas cargas, etc.

Uma forma muito efetiva para melhorar o modelo das cargas não lineares é obtida utilizando o modelo equivalente de *Norton* que se descreve na figura 3.2 (OLIVEIRA, 2011).

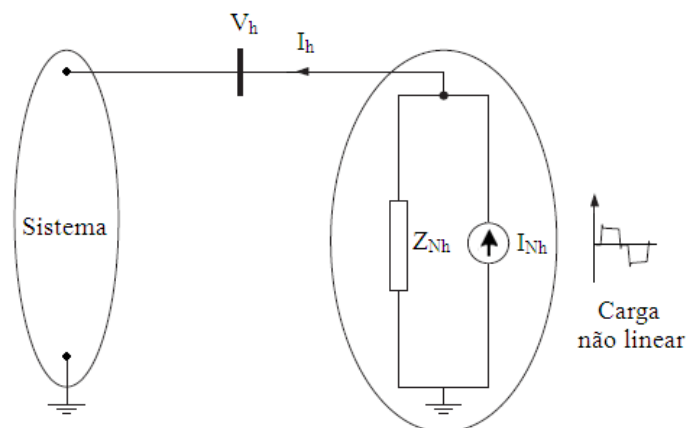


Figura 3. 2 - Modelo equivalente de Norton.

Para determinar o modelo de *Norton*, é necessário realizar medições de tensão (V_h) no ponto de acoplamento comum e de corrente (I_h) injetada pela carga não linear em duas condições de operação $i, i+1$.

Considerando que o modelo equivalente de Norton (Z_{Nh}, I_{Nh}) não troca nestas duas condições de operação, as correntes e tensões medidas em ambas as condições relacionam-se para a carga da barra k mostradas em (3.5) e (3.6):

$$I_{h,k,i} = I_{Nh,k} - \frac{V_{h,k,i}}{Z_{Nh,k}} \quad (3.5)$$

$$I_{h,k,i+1} = I_{Nh,k} - \frac{V_{h,k,i+1}}{Z_{Nh,k}} \quad (3.6)$$

Desta forma, os parâmetros do modelo Norton para a carga da barra k se determinam como em (3.7) e (3.8):

$$Z_{Nh,k} = \frac{V_{h,k,i} - V_{h,k,i+1}}{I_{h,k,i+1} - I_{h,k,i}} \quad (3.7)$$

$$I_{Nh,k} = I_{h,k,i} + \frac{V_{h,k,i}}{Z_{Nh,k}} \quad (3.8)$$

Portanto, em lugar de utilizar um espectro típico de harmônicos, pode-se empregar o equivalente de Norton típico da carga não linear em cada barra k e alterar as correntes $I_{Nh,k}$ e seus ângulos de acordo com a corrente de frequência fundamental calculadas por um fluxo de potência a frequência fundamental para uma condição dada do sistema elétrico.

Considerando que a rede se comporta de forma linear (não há interdependências entre as correntes dos distintos harmônicos superiores), pode-se separar a análise da penetração de cada harmônico na rede elétrica. Como para cada harmônico h , verifica-se a expressão matricial das tensões de barra, então (3.9):

$$I_h = Y_h \cdot V_h \quad (3.9)$$

Em que, $I_h(N \times I)$ é o vetor composto pelas N fontes de corrente de Norton das cargas não lineares para o harmônico h , $Y_h(N \times N)$ é a matriz admitância da rede elétrica (inclui as impedâncias Z_{Nh} dos equivalentes do Norton) e $V_h(N \times I)$ é o vetor das tensões de barra.

A matriz admitância para o harmônico h se constrói com os modelos que são empregados para representar os geradores, transformadores, linhas, cargas lineares, capacitores, filtros e outros elementos que compõem a rede elétrica (ARRILLAGA, 2003). Finalmente, as tensões do harmônico h para cada barra k , obtêm-se pela expressão (3.10):

$$V_h = Y_h^{-1} \cdot I_h = Z_h \cdot I_h \quad (3.10)$$

Onde Z_h é a matriz impedância de barras da rede para o harmônico h .

3.3.2 Fluxo de potência a frequência fundamental

Para avaliar o cumprimento dos limites de tensão do PRODIST-Módulo 8, é necessário contar com um método que permita calcular as tensões nas barras para qualquer cenário, antes e depois de instalados os equipamentos compensadores da potência reativa.

Além disso, antes de determinar a propagação dos harmônicos pela rede, é necessário resolver um fluxo de potência a frequência fundamental que determine as tensões nas barras e as correntes dos geradores e as cargas. Estas tensões e correntes permitem avaliar as correntes harmônicas das cargas não lineares para as condições do sistema.

A determinação das tensões nas barras a partir do conhecimento das potências ativas e reativas das cargas é o propósito fundamental do estudo de fluxo de potência ou fluxo de carga. O princípio para solucionar o método, é resolver o sistema de equações lineares (3.9) para frequência fundamental ($h = 1$) em (3.11):

$$I_1 = Y_1 \cdot V_1 \quad (3.11)$$

Em que, Y_1 é a matriz admitância de barras da rede elétrica e V_1, I_1 são os vetores das tensões e correntes nas barras a frequência fundamental.

Para o cálculo da penetração de harmônicos é necessário formar a matriz admitância para cada frequência h , e para o fluxo de potência a frequência fundamental o mesmo procedimento é utilizado para formação da matriz Y , agora para $h = 1$.

Como se conhece, as correntes injetadas nas barras dependem das potências geradas $S_G = P_G + jQ_G$ e das cargas $S_L = P_L + jQ_L$, de forma que para a barra k em (3.12):

$$I_{1,k} = \frac{(S_{Gk} - S_{Lk})^*}{V_{1,k}^*} = \frac{(P_{Gk} - P_{Lk}) - j(Q_{Gk} - Q_{Lk})}{V_{1,k}^*} \quad (3.12)$$

Se ao menos uma barra tem tensão conhecida, o sistema de equações não lineares tem solução por qualquer dos métodos usualmente empregados: *Gauss-Seidel*, *Newton-Raphson* (ARRILLAGA, 2003), método da soma de potências (CHIANCA, 2005) entre outros.

Entretanto, um método apropriado para redes de distribuição de médio tamanho é o método de fluxo de potência pela matriz impedância de barras, que se apoia no seguinte procedimento:

Se N_1 for o conjunto de barras com tensão conhecida e N_2 o conjunto de barras com potência conhecida (barras de carga), a relação (3.11) pode ser expressa como (3.13):

$$\begin{bmatrix} I_{1(N_1)} \\ I_{1(N_2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{1(N_1, N_1)} & Y_{1(N_1, N_2)} \\ Y_{1(N_2, N_1)} & Y_{1(N_2, N_2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1(N_1)} \\ V_{1(N_2)} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Como $V_{1(N_1)}$ é conhecido, obtém-se a expressão (3.14) como:

$$V_{1(N_2)} = Y_{1(N_2, N_2)}^{-1} \cdot (I_{1(N_2)} - Y_{1(N_2, N_1)} \cdot V_{1(N_1)}) \quad (3.14)$$

Desta maneira, a solução do fluxo de potência a frequência fundamental é obtido pelo seguinte algoritmo.

- Calcula-se a matriz admitância de barras Y_I e a inversa $Y_{I(N_2, N_2)}^{-1}$;
- Estima-se uma aproximação inicial para as tensões nas barras;
- Repete-se até a convergência das tensões
- Calculam-se as correntes $I_{I(N_2)}$ nas barras de carga (3.12)
- Calcula-se $V_{I(N_2)}$ mediante (3.14).
- Verifica-se a convergência

Este algoritmo normalmente apresenta muito boa convergência e em só 5 – 6 iterações determinam-se as tensões nas barras com uma boa precisão.

3.4 Implementação computacional

O uso de AG's para a otimização de qualquer problema matemático, requer a realização de múltiplas avaliações das funções objetivos do problema. Para uma população de pop indivíduos e um número de gerações gen , um algoritmo genético simples (SGA) realiza $pop \times gen$ avaliações da função objetivo, enquanto que o algoritmo NSGA-II realiza aproximadamente 1.5 vezes da quantidade especificada. Isto significa para uma população de 150 indivíduos e 150 gerações um total de 33.750 avaliações de funções.

Como observado no seguinte capítulo, à avaliação das funções objetivo e restrições do problema de compensação de potência reativa passam pela determinação dos custos de operação e os índices de distorção da rede elétrica que opera em L estados de carga característicos. Ou seja, é preciso realizar L execuções de fluxos de potência à frequência fundamental e às H frequências dos harmônicos considerados.

Por exemplo, se o circuito a ser avaliado possuir cinco estados de carga e dez harmônicos característicos, é preciso calcular cinco fluxos de potência a frequência fundamental e cinco fluxos de harmônicos para cada frequência h , o que implica obter cinco vezes as dez matrizes impedância das redes correspondentes aos harmônicos considerados, no total de 50 matrizes que se obtêm por inversão das correspondentes matrizes de admitância. Se fossem realizados 150 gerações de uma população de 150 indivíduos seriam necessários

avaliar 168.750 cálculos de fluxos de carga à frequência fundamental e determinar 1.687.500 matrizes impedância da rede, o que supõe um esforço de cálculo considerável.

Como pode ser observado, o maior esforço de cálculo em cada avaliação das funções objetivo, dedica-se à formação e inversão das $L \times H$ matrizes admitância Y_h para obter posteriormente as matrizes impedância Z_h da rede.

Entretanto, cada uma das soluções de compensação que se demonstram, somente incorpora um número reduzido de compensadores (capacitores e/ou filtros passivos de harmônicos) à rede original, o que faz pensar na possibilidade de obter a matriz impedância Z_h modificando a matriz impedância do caso base (sem compensadores) $Z_h^{(0)}$ a partir da metodologia de formação da matriz impedância de barra que se encontra na literatura (STAGG 1968).

A adição de um compensador de potência reativa à rede original se manifesta como a adição de uma impedância entre os nós p e q , como mostrado na figura 3.3.

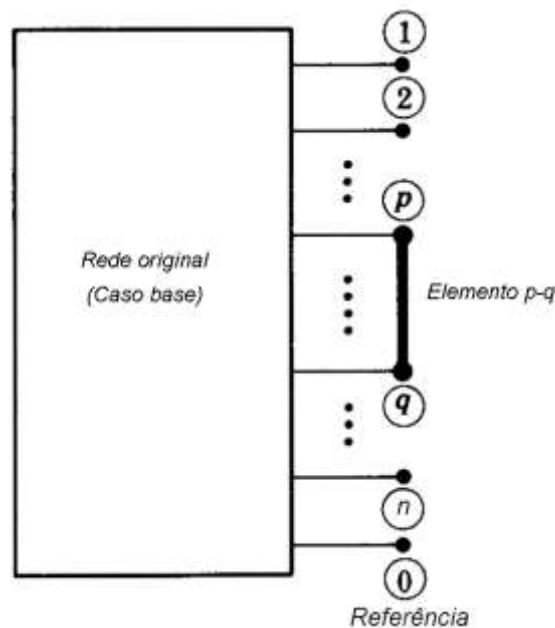


Figura 3. 3 - Adição de um elemento.

O procedimento matemático para modificar a matriz impedância Z de N^2 elementos se descreve a seguir:

- 1) Determina-se um vetor u de $N+1$ elementos que se calcula como em (3.15):

$$\begin{aligned} u_i &= Z_{p,i} - Z_{q,i} & \text{para } i = 1, 2, \dots, n \\ u_l &= u_p - u_q + z_{pq,pq} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Se, o nó p coincide com a referência, os elementos $Z_{p,i}$ se consideram de valor zero, e $z_{pq,pq}$ representa a impedância do elemento que é adicionado à rede.

2) Determina-se a nova matriz $Z(nova)$ mediante o procedimento de redução (3.16):

$$Z(nova)_{i,j} = Z_{i,j} - \frac{u_i \cdot u_j}{u_i} \quad \text{para } i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3.16)$$

Para aplicar este procedimento que evita a formação e inversão da matriz Y_h , somente é preciso armazenar na memória a matriz de impedância do caso base.

3.4.1 Implementação do cálculo de fluxo de harmônicos

A implementação computacional deste procedimento de cálculo é realizado mediante a programação de duas funções diferentes em linguagem *Matlab 2012* para o fluxo de harmônicos: *harmflow1* e *harmflow2* cuja utilidade se descreve a seguir:

A função *harmflow1* é utilizada para realizar o fluxo de harmônicos da rede original sem compensadores (*data*) para um estado de carga *stat* determinado em (3.17):

$$\text{function } [V_h, I_h, Z_h] = \text{harmflow1}(\text{data}, \text{stat}) \quad (3.17)$$

Como resultados se obtém V_h e I_h , que são matrizes $N \times H$ que armazenam as tensões e correntes harmônicas nas N barras da rede para cada harmônico e Z_h é um arranjo de três dimensões $N \times N \times H$ que armazena as H matrizes impedância de dimensão $N \times N$ obtidas para cada harmônico mediante a formação e inversão da matriz admitância correspondente.

A função *harmflow2* se emprega para realizar o cálculo de fluxo de harmônicos da rede modificada pela adição dos compensadores x_{comp} para um estado de carga determinado em (3.18):

$$\text{function } [V_h, I_h] = \text{harmflow2}(\text{data}, \text{stat}, Z_h, x_{comp}) \quad (3.18)$$

Como resultados se obtém V_h e I_h , que são matrizes $N \times H$ que armazenam as tensões e correntes harmônicas nas N barras da rede para cada harmônico depois de instalados os compensadores de potência reativa.

Neste procedimento utilizam-se como dados as matrizes Z_h calculadas para o estado de carga *stat* pela função *harmflow1* quando se analisa o caso base. Utilizando o procedimento descrito em (3.15) e (3.16), atualizam-se as matrizes $Z_h(nova)$ com a adição dos ramos dos compensadores, o qual evita a formação e inversão da matriz admitância de cada harmônico.

3.4.2 Implementação do fluxo de potência à frequência fundamental

A implementação computacional deste procedimento de cálculo realiza-se mediante a programação de duas funções diferentes para o fluxo de potência: *loadflow1* e *loadflow2* cuja utilidade se descreve a seguir:

A função *loadflow1* é empregada para realizar o fluxo de potência a frequência fundamental da rede original sem compensadores (*data*) para um estado de carga *stat* determinado em (3.19):

$$\text{function } [V_1, I_1, Z_{22}] = \text{loadflow1}(\text{data}, \text{stat}) \quad (3.19)$$

Como resultados se obtêm V_1 e I_1 , que são vetores $N \times 1$ que armazenam as tensões e correntes de frequência fundamental nas N barras da rede e Z_{22} é uma matriz de dimensões $N_2 \times N_2$ que representa a inversa $(Y_{N_2, N_2})^{-1}$ empregada na expressão (3.14) para realizar as iterações do fluxo de potência.

A função *harmflow2* se emprega para realizar o fluxo de potência da rede modificada pela adição dos compensadores x_{comp} para um estado de carga determinado em (3.20):

$$\text{function } [V_1, I_1] = \text{loadflow2}(\text{data}, \text{stat}, Z_{22}, x_{comp}) \quad (3.20)$$

Como resultados se obtêm V_1 e I_1 , que são vetores $N \times 1$ que armazenam as tensões e correntes de frequência fundamental nas N barras da rede depois de instalados os compensadores de potência reativa.

Este procedimento utiliza como dado a matriz Z_{22} calculada para o estado de carga *stat* pela função *loadflow1* quando analisou o caso original, o qual evita a formação e inversão da matriz admitância da rede.

3.5 Conclusões

Para determinar os custos de operação, os índices de qualidade da energia e checar os limites de distorção harmônica na rede elétrica é preciso contar com fluxos de potência a frequência fundamental e de harmônicos, os quais foram implementados em linguagem *Matlab 2012* para a realização deste trabalho.

Foi realizada uma implementação computacional do cálculo de fluxos de potência que minimiza o esforço de cálculo com o objetivo de diminuir o tempo de avaliação de cada uma das variantes de compensação que realiza o algoritmo genético.

Além disso, implementaram-se as funções necessárias para avaliar os limites de harmônicos da norma PRODIST-módulo 8.

CAPÍTULO IV

OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DA COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA

4.1 Introdução

A CPR para sistemas de distribuição de energia elétrica é feita por seleção e instalação de bancos de capacitores em determinados pontos do circuito com o objetivo de reduzir custos operacionais anuais de tais sistemas. Esta redução de custo é evidenciada por dois efeitos principais:

- 1) A redução das perdas de energia nos elementos série do circuito pela redução da potência reativa circulante para as diferentes horas do dia;
- 2) A diminuição das perdas de potência que ocorrem no horário de máxima carga, o que diminui a carga máxima e, portanto, libera capacidade elétrica nos elementos série da rede.

Entretanto, nas condições atuais dos circuitos, em que se utilizam cada vez mais carga com comportamento não-linear, tem-se que considerar a distorção produzida pelos harmônicos destas cargas e o aparecimento de possíveis ressonâncias (série ou paralelo) com os bancos de capacitores existentes.

Desta forma, em um circuito contaminado por harmônicos, a alternativa mais econômica de localização e seleção dos bancos de capacitores considerando somente os resultados econômicos, a frequência fundamental, pode resultar no incremento dos índices de distorção harmônica, e, portanto ser inviável do ponto de vista da QEE, quando se considera o efeito da variação de projeto que leva em conta todas as frequências harmônicas existentes na rede.

Uma solução para essa situação seria considerar as restrições da QEE pertinentes ao problema. Entretanto, se duas soluções de igual comportamento econômico e que atendem as restrições da QEE correspondentes, têm diferentes efeito sobre os índices da QEE, sempre vai ser melhor aquela que proporcione uma menor distorção da tensão nas barras do sistema.

Não obstante, para obter uma melhor avaliação das possíveis soluções do problema e como estas influenciam sobre os indicadores de distorção harmônica da rede, pode se incluir como objetivo adicional da otimização, a redução desta distorção. Desta forma, não se obteria somente uma solução ao problema, mas sim, poder-se-ia avaliar um conjunto de soluções que

com benefícios econômicos semelhantes pudessem ter diferentes efeitos sobre os índices da QEE.

Outros meios compensadores da potência reativos mais adequados para circuitos contaminados por harmônicos são os filtros harmônicos passivos do tipo paralelo, os quais unem a sua ação de filtragem, também a injeção de potência reativa à rede. Estes filtros devem ser utilizados quando não existir solução factível do problema mediante o uso exclusivo de banco de capacitores ou quando as soluções com filtro são mais atrativas do ponto de vista econômico.

Os filtros passivos paralelos são formados por um arranjo de capacitores, indutores e resistores que devem ser calculados adequadamente para se obter a redução desejada da distorção de tensão e evitar a circulação das correntes harmônicas pelo sistema elétrico.

Normalmente estes filtros são especificados por seu tipo, sua potência reativa à frequência fundamental, sua frequência de sintonia e seu fator de qualidade. Desta maneira, quando se fala de otimizar filtros passivos se entende a determinação dos parâmetros dos filtros que garantam o seu melhor desempenho.

Ao utilizar filtros passivos paralelos para compensar a potência reativa, deve-se incluir sempre como função objetivo, a minimização da distorção da tensão nas barras, pois este é o objetivo principal para utilizar filtros em uma instalação elétrica (LEITE, 2013).

4.2 Modelo matemático do problema

Tendo em vista os aspectos expostos, a presente tese formula o problema de otimização da compensação da potência reativa em sistemas elétricos de distribuição como um problema multiobjetivo que busca a seleção e localização dos equipamentos compensadores necessários para minimizar:

- 1) O custo dos equipamentos compensadores selecionados;
- 2) O custo de operação anual do sistema elétrico;
- 3) A distorção total da tensão nas barras do sistema elétrico;
- 4) Como restrições do problema de otimização, estabelece-se o cumprimento de:
- 5) As normas de QEE;
- 6) As normas de utilização dos equipamentos compensadores.

4.2.1 Variáveis do problema

As variáveis independentes do problema de otimização, representadas pelo arranjo x , são: o número, localização e parâmetros de projeto dos compensadores de potência reativa (bancos de capacitores ou filtros harmônicos) a serem instaladas no circuito.

Embora normalmente se possam empregar bancos de capacitores fixos (unidades conectadas permanentemente) ou controlados (unidades que entram ou saem de operação de acordo com as necessidades), nesta formulação somente vão ser considerados compensadores fixos, já que a presença de harmônicos torna mais complexa a utilização de capacitores controlados e normalmente os filtros harmônicos passivos não são controlados (IEEE Std. 1531, 2003).

Apesar dos filtros mais utilizados nos sistemas elétricos de distribuição de média tensão sejam os filtros sintonizados, nesta tese vão ser considerados também os filtros amortecidos de segunda ordem como possíveis compensadores a serem empregados.

Em um AG, as características de um indivíduo são expressas pelo *cromossomo* que o define. A codificação das variáveis do problema no *cromossomo* do algoritmo genético é realizada de acordo com o tipo de codificação que é empregado e a implementação computacional utilizada, seja uma codificação binária clássica ou outro tipo de codificação adequada para a representação das variáveis.

Na maioria dos casos, o mais cômodo é utilizar uma codificação em números reais “*real coded GA*”. Este é o caso da implementação computacional do algoritmo genético empregado nesta tese, o que torna mais fácil a interpretação dos dados armazenados no dito *cromossomo*.

Como um dos resultados que se quer obter é precisamente o número de equipamentos compensadores a ser utilizados, o conjunto de dados que representa uma solução é de tamanho variável, portanto, este *cromossomo* deve ter um tamanho suficiente para representar os parâmetros do número máximo de compensadores ($NVMAX$) que se desejam utilizar.

Desta maneira, quando se define o problema de otimização a ser resolvido, têm-se que especificar três dados que determinam o tamanho do *cromossomo*: o número máximo de capacitores ($NCMAX$), o número máximo de filtros sintonizados ($NF1MAX$) e o número máximo de filtros de segunda ordem ($NF2MAX$) que podem ser empregados no circuito analisado, em que, $NVMAX=NCMAX+NF1MAX+NF2MAX$.

Uma vez definidas suas dimensões, o cromossomo fica composto pelos seguintes componentes, apresentados na tabela 4.1:

Tabela 4. 1 - Composição do cromossomo.

Variável	Descrição
N_C	Número de capacitores
N_{F1}	Número de filtros sintonizados
N_{F2}	Número de filtros de segunda ordem
Q_{TOT}	Potência reativa total em capacitores
Fd	Arranjo de fatores de distribuição da potência reativa entre os compensadores
U	Arranjo de localizações dos compensadores no circuito
Q	Arranjo de fatores de qualidade dos filtros
F	Arranjo de frequências de sintonia dos filtros

A figura 4.1, representa o esquema do cromossomo empregado, em que se destacam as partes do cromossomo correspondente aos arranjos f_d , u , Q e f .



Figura 4. 1 - Esquema do cromossomo.

Os primeiros elementos do cromossomo são números inteiros N_C , N_{F1} e N_{F2} que representam o número de capacitores, filtros sintonizados e de segunda ordem selecionados pelo algoritmo, em que, $(0 \leq N_C \leq N_{CMAX})$, $(0 \leq N_{F1} \leq N_{F1MAX})$ e $(0 \leq N_{F2} \leq N_{F2MAX})$.

Isto quer dizer que mesmo quando o número máximo de algum tipo de compensador (capacitor, filtro sintonizado ou filtro de segunda ordem) for maior que um, a variação de solução pode não conter nenhum compensador deste tipo.

Em lugar de determinar diretamente a potência reativa de cada compensador empregado na solução, o *cromossomo* contém um valor escalar Q_{TOT} e um arranjo fd de

fatores de distribuição da potência reativa total entre os diferentes compensadores empregados.

A potência reativa total Q_{TOT} (kvar) representa a soma da potência reativa dos capacitores de todos os compensadores que vão ser instalados, sendo esta potência determinada entre a potência reativa mínima Q_{min} e um valor Q_{max} ligeiramente (5-10%) maior que a potência reativa máxima que é consumida no circuito analisado ($Q_{min} \leq Q_{TOT} \leq Q_{max}$).

Se for considerado que os capacitores a serem empregados nos compensadores são múltiplos de unidades de tamanho U_{SIZE} (kvar), o máximo número de unidades que podem ser instaladas em uma barra U_{NUM} é determinado da seguinte forma:

$$U_{NUM} = \text{round}(Q_{max} / U_{SIZE}) \quad (4.1)$$

O arranjo fd tem N_{VMAX} elementos inteiros demarcados entre 1 e U_{NUM} que representam em que forma se distribui a potência reativa total calculada Q_{TOT} entre os compensadores selecionados. Deste arranjo são utilizados os $N_V = N_C + N_{F1} + N_{F2}$ elementos correspondentes às quantidades de elementos selecionados para a variável.

Se o fator de distribuição de potência reativa para o compensador i é fd_i , a potência reativa do capacitor correspondente a este compensador é calculada da seguinte forma:

1) Determina-se a potência reativa não padrão do capacitor Q_{c_i} proporcional ao valor do fator de distribuição do ramo (AZEVEDO et. al., 2014):

$$Q_{c_i} = Q_{TOT} \cdot fd_i / \sum_{j=1}^N fd_j \quad (4.2)$$

2) Determina-se o número de unidades padrão de capacitores que melhor aproximam o valor de potência reativa não padrão Q_{c_i} .

$$U_{NUM_i} = \text{round}(Q_{c_i} / U_{SIZE}) \quad (4.3)$$

Este procedimento permite que a distribuição da potência reativa entre os distintos compensadores seja determinada pelo próprio método de otimização a partir das necessidades do problema. Ou seja, esta é uma forma de resolver o problema de distribuir eficientemente a potência dos compensadores entre as localizações determinadas, sem perigo de que se instale uma capacidade total excessiva para o circuito.

O arranjo u dos N_{VMAX} elementos será utilizado para determinar a localização dos compensadores no circuito. Deste arranjo empregam-se os N_V elementos correspondentes às quantidades de elementos selecionados.

A localização de cada compensador i é determinada pelo valor da variável inteira u_i , que pode tomar como valores os possíveis índices do conjunto das barras pré-selecionadas como candidatas para a possível localização dos compensadores. Não se especificam restrições em pontos estratégicos de localizações, por isso, vários compensadores podem compartilhar a mesma localização no circuito.

O arranjo Q de fatores de qualidade tem $N_{FMAX}=N_{F1MAX}+N_{F2MAX}$ elementos. Os primeiros N_{F1} elementos do arranjo são os fatores de qualidade dos filtros sintonizados, enquanto que os N_{F2} elementos a partir do $N_{F1MAX}+1$ são os fatores de qualidade dos filtros de segunda ordem.

O fator de qualidade dos filtros sintonizados é normalmente alto, empregando as cotas ($10 \leq Q \leq 50$) para esta parte do arranjo. Por outro lado, o fator de qualidade dos filtros de segunda ordem é normalmente baixo, empregando o intervalo ($0.5 \leq Q \leq 10$) para esta parte do arranjo.

O arranjo f tem N_{FMAX} elementos. Os primeiros N_{F1} elementos do arranjo são valores inteiros que representam os índices de um arranjo de frequências possíveis para este tipo de filtros que são pré-selecionadas antes de realizar a otimização, Por outro lado, os N_{F2} elementos a partir do $N_{F1MAX}+1$ são diretamente proporcionais às frequências de sintonia dos filtros de segunda ordem.

As frequências de sintonia possíveis dos filtros sintonizados são obtidas a partir dos indicadores de distorção da tensão no sistema e estas não correspondem exatamente às frequências h_1, h_2, \dots, h_m dos harmônicos que se desejam eliminar. Em seu lugar, estes ramos são sintonizados a 94% das frequências de corte para se evitar possíveis amplificações dos harmônicos inferiores mais próximos às frequências que se desejam filtrar (NASIFF, 2008; LEITE, 2013).

Por outro lado, as frequências de sintonia dos filtros de segunda ordem são valores reais localizados entre as frequências mínima (h_{min}) e máxima (h_{max}) encontradas no espectro de harmônicos da tensão.

Partindo da estrutura do *cromossomo* utilizado, uma vez que este é determinado pelo algoritmo genético para uma solução dada, o número, localização e parâmetros de projeto dos compensadores a serem instalados ficam determinados diretamente.

4.2.2 Funções objetivo e restrições

O problema de otimização tratado pode ser formalizado mediante duas formulações multiobjetivo que em certo modo são equivalentes: uma de três e outra de só duas funções objetivo.

A primeira formulação compreende a minimização dos três objetivos seguintes:

- a) O custo do investimento dos compensadores;
- b) O custo anual de operação da rede;
- c) A distorção total de harmônicos de tensão.

Enquanto que a segunda compreende:

- a) A maximização do valor presente líquido do projeto de compensação;
- b) A minimização da distorção total de harmônicos de tensão.

4.2.2.1 Custo de investimento dos compensadores

Os compensadores de potência reativa, sejam capacitores ou filtros de diferentes tipos, têm um custo de investimento $I(x)$ composto pelos custos do: capacitor, reator, resistor e outros elementos. Os custos do capacitor, reator e resistor são proporcionais a suas respectivas potências para cada nível de tensão, enquanto que outros componentes do custo podem supor-se proporcionais à potência reativa do compensador (KAWAN, 1996).

Desta maneira, o custo de investimento dos compensadores é dado por (AZEVEDO, et. al., 2014):

$$I(x) = K_C \sum_{i \in C_C} Q_{Ci} + K_L \sum_{i \in C_L} Q_{Li} + K_R \sum_{i \in C_R} P_{Ri} \quad (4.4)$$

Onde K_C (\$/kvar), K_L (\$/kvar) e K_R (\$/kW) são os coeficientes de custo da potência de capacitores Q_C , indutores Q_L e resistores P_R respectivamente e C_C , C_L e C_R representam os conjuntos de cada um destes tipos de elementos.

4.2.2.2 Custo anual de operação da rede

As redes elétricas de distribuição de média tensão suprem cargas residenciais, industriais e comerciais que seguem um padrão de comportamento diário bastante estável.

A CPR das cargas mediante o emprego de compensadores de potência reativa reduz as correntes circulantes pela rede, liberando capacidade elétrica nos transformadores e linhas,

reduzindo as perdas de potência ativa e as quedas de tensão em cada estado de carga do circuito.

Para considerar o efeito dos equipamentos compensadores de potência reativa no custo de operação da rede, vão ser considerados dois componentes de custo fundamentais: o custo da demanda máxima da carga e o custo da energia consumida em perdas (GRAINGER, 1989).

O custo da demanda máxima consiste no custo em que investe a empresa distribuidora para disponibilizar a capacidade elétrica necessária de transformadores, linhas, etc. para garantir o fornecimento da potência máxima da carga. Como a CPR somente modifica as perdas de potência no circuito, este custo se avalia como proporcional às perdas de potência no horário de máxima demanda ΔP_{max} .

Por outro lado, o custo da energia se avalia como o custo anual das perdas de energia nos transformadores, linhas e outros elementos do circuito ΔE_a . Como a carga do circuito varia nos distintos L estados de carga característicos do mesmo, é preciso determinar perdas de energia como a somatória das perdas de energia de cada estado k de duração Δt_k (AZEVEDO et. al., 2014):

$$\Delta E_a = \sum_{k=1}^L \Delta P_k \cdot \Delta t_k \quad (4.5)$$

Desta maneira, os custos de operação anual da rede são calculados através da expressão (AZEVEDO et. al., 2014):

$$C(x) = c_D \cdot \Delta P_{max}(x) + c_E \cdot \sum_{k=1}^L \Delta P_k(x) \cdot \Delta t_k \quad (4.6)$$

Onde c_D (\$/kW) e c_E (\$/kWh) são os coeficientes de custos correspondentes a cada parte da função de custo de operação.

4.2.2.3 Valor presente líquido do projeto

O valor presente líquido (VPL) é um procedimento que permite calcular o valor presente de um determinado número de fluxos de caixa futuros, originados por um investimento. A metodologia consiste em descontar ao momento atual (quer dizer, atualizar mediante uma taxa) todos os fluxos de caixa futuros do projeto. A este valor é subtraído o investimento inicial, de tal modo que o valor obtido é o valor atual líquido do projeto.

O método de valor presente é um dos critérios econômicos mais utilizados na avaliação de projetos de investimento. Consiste em determinar a equivalência no ano zero dos

fluxos de efetivos futuros que gera um projeto e comparar esta equivalência com o desembolso inicial. Quando à equivalência é maior que o desembolso inicial, então, é recomendável que o projeto seja aceito.

Como a instalação de compensadores de potência reativa (capacitores ou filtros harmônicos) em um circuito é, em definitivo, um projeto de investimento que se procura obter lucros a partir da economia obtida no custo de operação da rede, pode-se avaliar o valor presente líquido como um indicador econômico que reúne em uma só função os custos de investimento e de operação da rede elétrica.

Considerando um período de avaliação de N anos com uma razão de interesse i , o VPL do projeto de compensação é calculado através da expressão (LEITE *et al.*, 2012):

$$VPL(x) = -I(x) + \sum_{k=1}^N (C(0) - C(x)) / (1+i)^k \quad (4.7)$$

Em que $C(0)$ representa os custos de operação da rede antes de serem instalados os compensadores de reativo e a diferença $(C(0) - C(x))$ os lucros anuais por conceito de economia.

4.2.2.4 Distorção harmônica total

Os bancos de capacitores são essencialmente equipamentos compensadores da potência reativa. Entretanto, estes podem amplificar o efeito dos harmônicos das cargas pela existência de ressonâncias série ou paralelo com os elementos indutivos da rede elétrica.

Não obstante, o efeito dos bancos de capacitores sobre a distorção da tensão nas barras do sistema depende da magnitude e localização dos mesmos no circuito, por isso pode existir uma solução mediante capacitores que não incremente os indicadores de distorção ou que inclusive os reduza.

Por outro lado, os filtros de harmônicos passivos são primariamente dispositivos de controle de harmônicos, cuja função é evitar a circulação de correntes distorcidas através dos elementos do sistema e reduzir a distorção harmônica da tensão nas barras. Portanto, uma correta seleção e localização destes compensadores podem reduzir substancialmente os índices de distorção harmônica.

Desta maneira, deve-se expressar diretamente como um objetivo adicional, a minimização da distorção total da tensão em todas as barras do circuito.

Considerando que todas as normas de controle de harmônicos limitam o valor máximo (de probabilidade 95% ou 99%) da distorção harmônica individual, parece o mais adequado

minimizar só o máximo valor do THD do conjunto U das barras do sistema e do conjunto L de todos os estados de carga considerados (IEC 61000-4-7, 2010; IEEE 519, 2004; PRODIST-MÓDULO 8, 2010; LEITE, et. al., 2014 e AZEVEDO, et al., 2014):

$$\max THD(x) = \max_{\substack{k \in L \\ i \in U}} \{THD_{k,i}(x)\} \quad (4.8)$$

Como foi observado anteriormente, a partir dos objetivos previamente expostos, podem ser formalizadas duas formas equivalentes do problema, cujas funções objetivo são:

1) Problema com três objetivos a minimizar (LEITE, et al., 2014):

$$\min \{f_1(x) = I(x), f_2(x) = C(x), f_3(x) = \max THD(x)\} \quad (4.9)$$

2) Problema com dois objetivos a minimizar

$$\min \{f_1(x) = -VPL(x), f_2(x) = \max THD(x)\} \quad (4.10)$$

Deve-se observar que a minimização do $-VPL(x)$ é igual a maximização do $VPL(x)$.

O conjunto de restrições do problema considera dois tipos de restrições fundamentais:

- 1) As restrições de qualidade da tensão nas barras do sistema;
- 2) As restrições ao estresse dos componentes dos compensadores.

A forma de avaliação das restrições de qualidade da tensão depende da norma adotada para avaliar os problemas de qualidade. Para garantir que o programa de otimização obtenha soluções factíveis ao problema, define-se uma função de penalidade para as restrições que se avalia como a soma quadrática de todas as violações às restrições do problema, quer dizer (AZEVEDO, et al., 2014 e LEITE et.al, 2014):

$$g(x) = \sum_{calc_i(x) > limit_i} (calc_i(x) - limit_i)^2 \quad (4.11)$$

Onde $calc_i$ e $limit_i$ representam o valor calculado e o valor limite do parâmetro i limitado pelas restrições correspondentes.

Os diferentes parâmetros limitados por condições limites e o cálculo dos termos adicionados a $g(x)$ em caso de descumprimento destas restrições são apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4. 2 - Avaliação das restrições.

Parâmetro limitado	Condição limite	Termo que se adiciona a $g(x)$
Valor modular da tensão $V_{m_{k,i}}$ para todo cenário k e barra i	$V_{m_{k,i}} \leq V_{lim_i}$	$(V_{m_{k,i}} - V_{lim_i})^2$
Distorção total da tensão $THD_{k,i}$ para todo cenário k e barra i	$THD_{k,i} \leq THD_{lim_i}$	$(THD_{k,i} - THD_{lim_i})^2$
Distorção individual da tensão $IHD_{k,i,h}$ para todo cenário k , barra i e harmônico h	$IHD_{k,i,h} \leq IHD_{lim_{i,h}}$	$(IHD_{k,i,h} - IHD_{lim_{i,h}})^2$
Tensão $V_{c_{k,i}}$ aplicada ao capacitor j no cenário k	$V_{c_{k,j}} \leq 1.1V_{cnom_j}$	$(V_{c_{k,j}} - 1.1V_{cnom_j})^2$
Tensão pico $V_{cpeak_{k,j}}$ aplicada ao capacitor j no cenário k	$V_{cpeak_{k,j}} \leq 1.2\sqrt{2}V_{cnom_j}$	$(V_{cpeak_{k,j}} - 1.2\sqrt{2}V_{cnom_j})^2$
Corrente $I_{c_{k,i}}$ circulante pelo capacitor j no cenário k	$I_{c_{k,j}} \leq 1.35I_{cnom_j}$	$(I_{c_{k,j}} - 1.35I_{cnom_j})^2$
Potencia reativa $Q_{c_{k,i}}$ gerada pelo capacitor j no cenário k	$Q_{c_{k,j}} \leq 1.35Q_{cnom_j}$	$(Q_{c_{k,j}} - 1.35Q_{cnom_j})^2$

Uma vez avaliadas todas as restrições do problema, $g(x)$ tem como valor a soma quadrática de todas as violações às restrições. Se $g(x)$ tem valor zero, a solução x será factível, enquanto que em caso contrário a solução não atende uma ou várias restrições.

Para incluir as restrições como uma função de penalidade no problema, este deve ser expresso para qualquer número de funções objetivo como:

$$\min \begin{cases} f_1(x) + \mu \cdot g(x) \\ \vdots \\ f_n(x) + \mu \cdot g(x) \end{cases} \quad (4.12)$$

Em que, μ é uma constante de alto valor que torna atrativa a redução de $g(x)$ e, portanto, a obtenção de uma solução factível do problema.

4.3 Algoritmo de otimização

A otimização multiobjetivo pertence à área dos problemas de otimização matemática que envolve várias funções objetivo que se devem otimizar simultaneamente. Normalmente

este tipo de otimização é realizado sobre funções objetivo que podem ter uma natureza conflitante, o que provoca que as decisões ótimas tenham que ser tomadas considerando os compromissos existentes entre dois ou mais objetivos. Diferentemente dos problemas de otimização de um objetivo, normalmente em um problema de otimização multiobjetivo não existe uma solução única que otimize simultaneamente cada objetivo. Quando isto ocorre, diz-se que as funções objetivo são conflitantes e em lugar de uma solução pode existir um conjunto de soluções para o problema, as quais se denominam soluções ótimas de Pareto.

Uma solução é chamada não-dominada ou solução ótima de Pareto se nenhum dos objetivos do problema pode ser melhorado em valor sem agravar o valor de algum dos restantes objetivos. Todas as soluções não-dominadas que integram a fronteira de Pareto podem ser consideradas igualmente boas. Portanto, um algoritmo de otimização multiobjetivo visa precisamente determinar tal conjunto de soluções (CASTRO, et al.,2014).

Um dos métodos de maior êxito na otimização multiobjetivo é o algoritmo elitista de otimização NSGA-II (LEITE, 2012). Este algoritmo, desenvolvido no ano 2000 por Deb, *et. al.* explica-se a seguir:

- 1) Como todo algoritmo genético, começa com a geração inicial ($t = 0$) pela criação de uma população P_0 formada por N indivíduos cujos cromossomos são gerados aleatoriamente;
- 2) Essa população inicial é ordenada em várias frentes não-dominadas, classificando as soluções de cada frente por uma ordem "rank" que se define 1 para o primeiro conjunto (soluções não-dominadas) e que vai aumentando para os conjuntos seguintes com menor nível de não-dominância como mostra a figura 4.2.

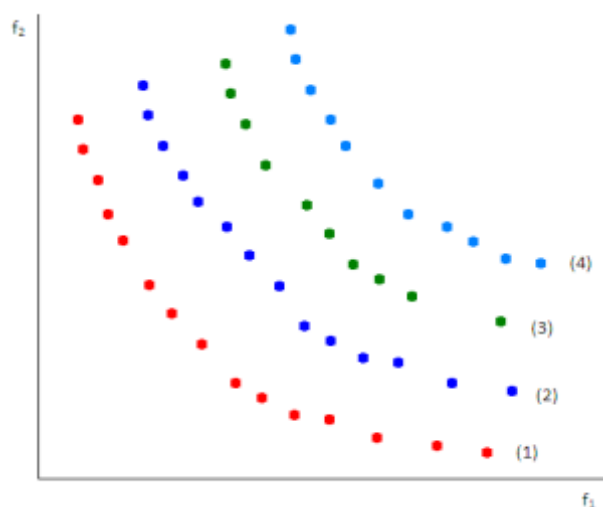


Figura 4. 2 - Ordenamento de frentes não dominadas. (problema de dois objetivos).

Além disso, calcula-se a distância à multidão (“*crowding distance*”) de todos os indivíduos de cada frente da população. Esta distância dá uma medida da diversidade das soluções da frente, quanto maior for à distância mais diversa é a solução e mais atrativa é como pai da nova geração. Como se pode ver na figura 4.3, a distância à multidão da solução i é calculada como o perímetro do cubóide cujos vértices são apresentados nas soluções vizinhas $i-1$ e $i+1$ (PEREIRA 2011). De forma geral, este procedimento se conhece como ordenamento não-dominado, termo que dá nome ao algoritmo.

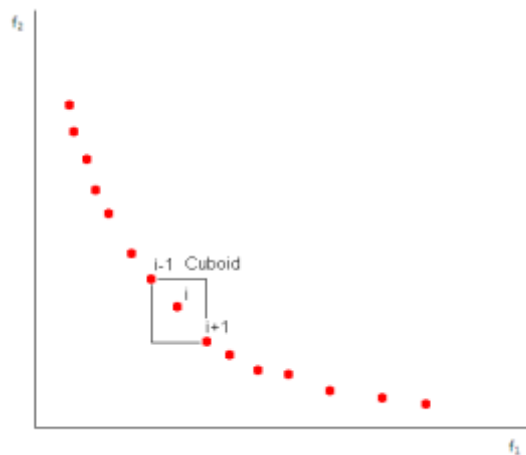


Figura 4. 3 - Distância à multidão.

- 3) Posteriormente a esta fase de inicialização, executa-se um laço até alcançar o número de gerações definido para a solução. A obtenção de cada geração P_{t+1} a partir da geração P_t que lhe antecede compreende os seguintes passos:
 - a. Utiliza-se uma técnica de seleção por torneio para determinar os pais que vão procriar a seguinte geração mediante os operadores de cruzamento e mutação. A solução i que ganha o torneio pertencerá a um conjunto não dominado de menor ordem, ou se para o mesmo conjunto, a solução i que ganha o torneio pertencerá a um conjunto denominado de menor ordem, ou se para o mesmo conjunto, a solução i tem uma maior distância à multidão que a compete no torneio;
 - b. Determinados os pais, estes originam uma nova população de indivíduos Q_t de tamanho N mediante os operadores de cruzamento e mutação;
 - c. Uma vez determinada a nova população, esta se mescla com a população original P_t para formar uma população resultante R_t de tamanho $2N$ que compreende os pais e os descendentes;
 - d. Esta população intermediária R_t é ordenada por conjuntos não-dominados e se

reduz a somente N indivíduos para formar a população nova P_{t+1} . A seleção dos novos indivíduos que formam a população P_{t+1} são realizados por um processo que preserva tanto o elitismo como a diversidade da população como mostra a figura 4.3).

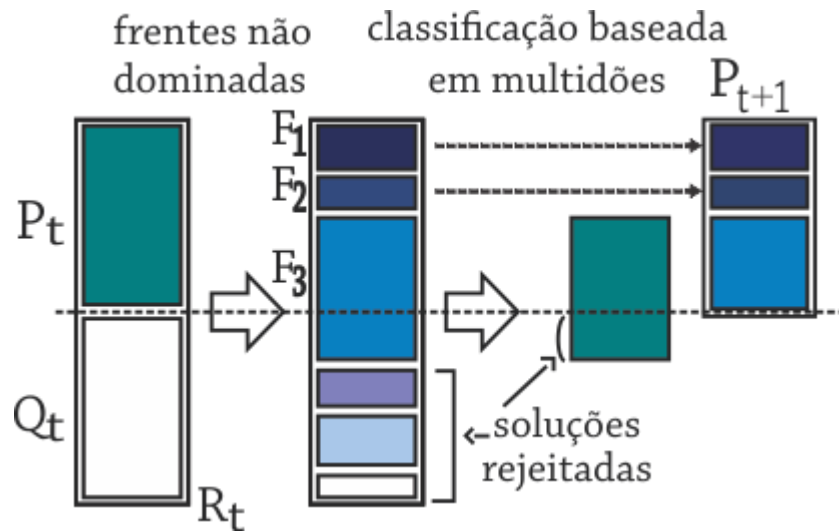


Figura 4. 4 - Obtenção da população P_{t+1} .

Fonte: (PEREIRA, 2011).

Neste processo, vão desaparecendo as frentes não-dominadas, e transcorrido certo número de gerações, a população fica formada exclusivamente pelo primeiro conjunto, que constitui a fronteira de Pareto ou o conjunto de soluções ótimas de Pareto do problema, que corresponde à solução final do algoritmo.

4.3.1 Características do algoritmo utilizado

Para a realização deste trabalho, modificou-se o algoritmo publicado por Sheshadri para incorporar variáveis inteiras além das variáveis reais. Desta maneira, obteve-se um algoritmo de otimização para problemas mistos em inteiros e reais que emprega uma codificação do cromossomo em números reais (SESHADRI, 2012).

Os operadores genéticos de cruzamento e mutação para as variáveis reais e inteiras são descritos a seguir:

4.3.1.1 Operador de cruzamento

O operador genético de cruzamento utiliza a técnica chamada “*Simulated Binary Crossover SBX*”, que simula o cruzamento entre cromossomos com codificação real. O cruzamento do elemento j dos progenitores p_{1j} e p_{2j} se realizam de acordo com os seguintes passos:

- a. Gera-se um número aleatório u_j uniformemente distribuído entre 0 e 1.
- b. Calcula-se o coeficiente β_j , mediante (SESHADRI, 2012):

$$\beta_j = \begin{cases} (2u_j)^{\frac{1}{\mu+1}} & \text{se } u_j \leq \frac{1}{2} \\ (1/(2-2u_j))^{\frac{1}{\mu+1}} & \text{se } u_j > \frac{1}{2} \end{cases} \quad (4.13)$$

Onde μ é o índice de cruzamento selecionado ($\mu=20$) (SESHADRI, 2012);

- c. Calculam-se os elementos j dos descendentes c_{1j} e c_{2j} mediante (SESHADRI, 2012):

$$\begin{aligned} c_{1j} &= \frac{1}{2}(1 + \beta_j)p_{1j} + \frac{1}{2}(1 - \beta_j)p_{2j} \\ c_{2j} &= \frac{1}{2}(1 - \beta_j)p_{1j} + \frac{1}{2}(1 + \beta_j)p_{2j} \end{aligned} \quad (4.14)$$

- d. Os elementos do tipo inteiro são obtidos mediante o arredondamento dos valores calculados a seus correspondentes inteiros mais próximos.

$$\begin{aligned} c_{1j} &= \text{round}(c_{1j}) \\ c_{2j} &= \text{round}(c_{2j}) \end{aligned} \quad (4.15)$$

- e. Finalmente, checam-se os limites mínimos e máximos para cada elemento de cada descendente seja real ou inteiro e em caso de não atendimento a estes limites, o elemento toma o valor limite permitido.

4.3.1.2 Operador de mutação

O operador genético de mutação realiza um procedimento semelhante ao anterior, com a diferença que se aplica a filhos. A mutação do elemento j do pai p_j se produz como segue:

- a. Gera-se um número aleatório r_j uniformemente distribuído entre 0 e 1;
- b. Calcula-se o incremento δ_j , mediante (SESHADRI, 2012):

$$\delta_j = \begin{cases} (x_{max_j} - x_{min_j}) \left((2r_j)^{\frac{1}{\mu m + 1}} - 1 \right) & \text{se } r_j < \frac{1}{2} \\ (x_{max_j} - x_{min_j}) \left(1 - \left(\frac{1}{2 - 2r_j} \right)^{\frac{1}{\mu m + 1}} \right) & \text{se } r_j \geq \frac{1}{2} \end{cases} \quad (4.16)$$

Em que, μm é o índice de mutação selecionado ($\mu m = 20$) e x_{max_j} , x_{min_j} são os valores limite do elemento j do cromossomo (SHESHADRI, 2012).

- c. Se o elemento j do descendente c_j é do tipo inteiro e o valor do módulo do incremento é menor que 1, seleciona-se um incremento δ_j mínimo de ± 1 conforme seja o caso.

- d. Calcula-se o elemento j do descendente c_j mediante a mutação:

$$c_j = p_j + \delta_j \quad (4.17)$$

- e. Se o elemento for de tipo inteiro, obtém-se mediante o arredondamento do valor previamente calculado a seu número inteiro mais próximo.

$$c_j = \text{round}(c_j) \quad (4.18)$$

- f. Finalmente, verificam-se os limites mínimos e máximos para o elemento seja real ou inteiro e em caso de não atendimento dos limites, o elemento toma o valor limite violado.

4.3.2 Cálculo das funções objetivo e restrições

O NSGA-II implementado utiliza uma função para avaliar todos os objetivos declarados, ou seja, $f_1(x)$, ... $f_n(x)$ e a função de restrições $g(x)$ a partir do arranjo x de variáveis independentes do problema (*cromossomo*). Esta função é definida como:

$$\text{function } f = \text{evaluate_functions}(x, \text{data}) \quad (4.19)$$

Onde o parâmetro *data* representa os dados adicionais necessários da rede elétrica e as cargas para determinar as funções objetivo.

O algoritmo que emprega a função *evaluate_functions* é o seguinte:

- 1) A partir dos dados do cromossoma x , determina o correspondente conjunto de compensadores (capacitores ou filtros), seus parâmetros e sua localização no sistema elétrico de distribuição;

- 2) Calcula o custo de investimento dos compensadores obtidos da solução em 1);
- 3) Para todos os L estados de carga considerados, analisa-se a operação do sistema elétrico de acordo com um programa de fluxo de potência à frequência fundamental (*function loadflow2*) e um programa de penetração de harmônicos (*function harmflow2*);
- 4) Com os resultados calculados para todos os estados de carga característicos, calcula o custo de operação da rede: custo das perdas de energia e custo das perdas no horário de pico;
- 5) Calcula os índices de distorção das tensões em todos os estados de carga possíveis e em todas as barras do sistema e determina o máximo valor do *THD* para avaliar a função objetivo correspondente;
- 6) Verificam-se as restrições de qualidade da energia em todos os estados de carga e em todas as barras e determina a saturação máxima em todos os capacitores. Com estes resultados avalia-se a função de restrições $g(x)$.

4.3.3 Algoritmo principal de otimização

O algoritmo principal de otimização realiza os seguintes passos:

- 1) Lê os dados do sistema, as cargas e a descrição do problema de otimização que se deseja resolver.
- 2) Determina o estado de operação inicial do sistema sem equipamentos compensadores de potência reativa conectados, mediante o seguinte procedimento:
 - a. Para todos os L estados de carga considerados, analisa a operação do sistema elétrico mediante um programa de fluxo de potência à frequência fundamental (*function loadflow1*) e um programa de penetração de harmônicos (*function harmflow1*);
 - b. Com os resultados calculados para todos os estados de carga característicos, calcula o custo inicial de operação da rede: custo das perdas de energia e custo das perdas no horário de pico;
 - c. Calcula os índices de distorção das tensões em todos os estados de carga possíveis e em todas as barras do sistema e determina o máximo valor inicial do *THD*.
- 3) Executa o algoritmo NSGA-II para produzir a fronteira de Pareto do problema.

- 4) Salva a população final do NSGA-II em um arquivo (*.mat) para a posterior análise das soluções obtidas.

Este algoritmo principal foi programado na função Matlab *nsga2fdist.m* com a seguinte sintaxe:

$$\text{function } f = \text{nsga2fdist}(@filename, \text{popsize}, \text{generations}) \quad (4.17)$$

Em que, *filename* é o nome do arquivo (*.m) que descreve o problema a ser otimizado, *popsize* é o tamanho da população e *generations* a quantidade de gerações a ser avaliada.

Em cada geração do algoritmo imprimem-se os valores mínimos e médios de cada função objetivo, assim como os parâmetros adicionais que se desejar.

Obtido o arquivo de resultados para o número de gerações especificadas, este é examinado com a função *dispresults.m* que permite visualizar os resultados obtidos e selecionar a variação a ser empregada de acordo com o seguinte algoritmo:

- 1) Mostra-se um gráfico de duas ou três dimensões (segundo o tipo de problema que se esteja resolvendo) com a fronteira de Pareto do problema;
- 2) Obtém-se um gráfico X,Y das funções objetivo das diferentes variações ordenadas sob o critério desejado;
- 3) Escolhem-se uma ou várias variações e imprimem-se os resultados.

CAPÍTULO V

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

5.1 Introdução

Este capítulo apresenta avaliações baseadas em um caso real no Pólo Industrial de Manaus (PIM), especificamente focando a Subestação de Aparecida, da Concessionária Amazonas Energia situada em Manaus-AM e objetiva aplicar a ferramenta computacional desenvolvida para a otimização multiobjetivo da compensação da potência reativa e a compensação de harmônicos considerando todos os aspectos técnicos e econômicos do problema e as restrições pertinentes, bem como, analisar a aplicabilidade da metodologia desenvolvida e a análise da aplicação do algoritmo aqui desenvolvido.

5.2 Rede Elétrica para o Estudo de Caso

Como exemplo para a aplicação da presente metodologia (ver Apêndice A) foi utilizado o alimentador **Aparecida #3** da cidade de Manaus como mostra a figura 5.1.

Este circuito de 13,8 kV alimenta 56 transformadores em cada um dos quais há uma mescla de cargas linear e não-linear de natureza residencial. A carga total instalada deste circuito é de 14,37 MVA que considerando um fator de potência de 0,9 representa uma potência ativa de 12,93 MW e uma potência reativa de 5,64 MVAR.

A carga não linear representa x por cento da carga linear em cada barra e se supõe balanceada entre as três fases. A carga se compõe de equipamentos eletrodomésticos com um espectro de frequência característico, o qual é mostrado no apêndice A.

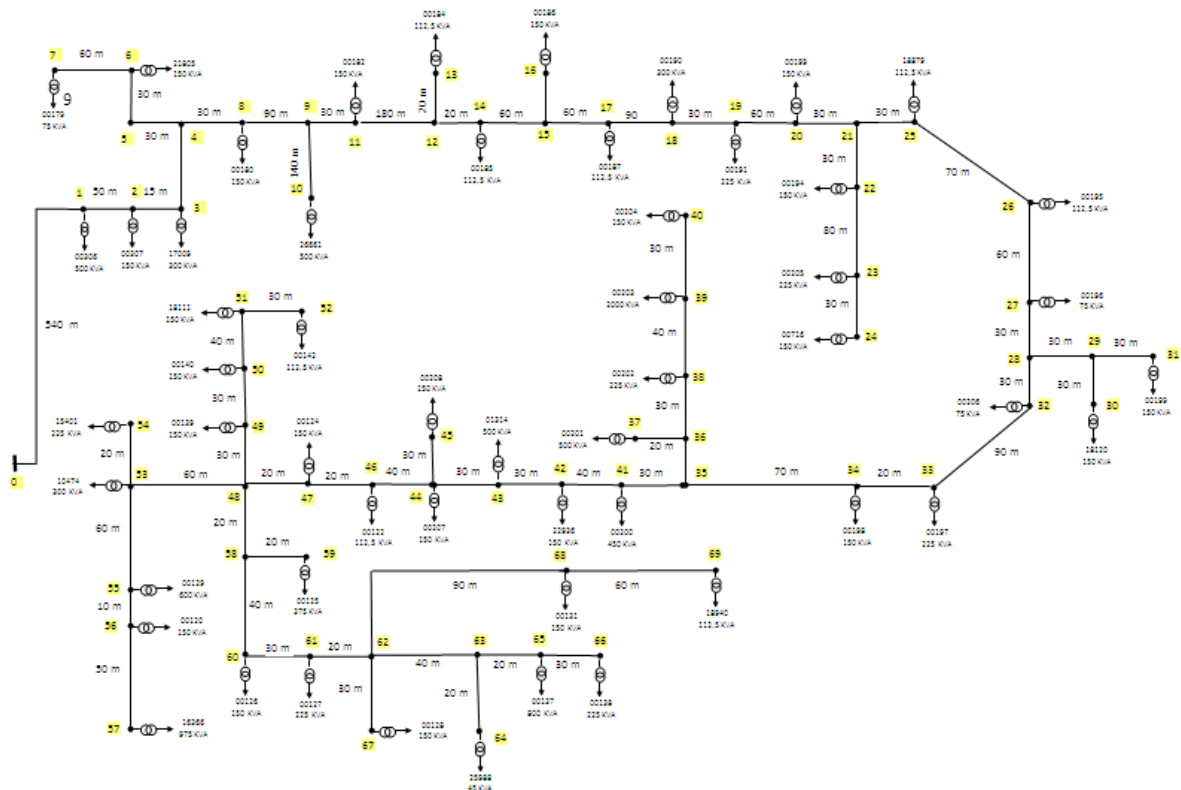
Para avaliar o comportamento do sistema vão se considerar três estados de carga possíveis em um ano característico, os quais são apresentados na tabela 5.1.

Tabela 5. 1 - Estados de carga

Parâmetro	Estados		
	1	2	3
Duração (horas/ano)	730	5840	2190
Carga (%)	100	60	30

Fonte: Eletrobras Amazonas Energia (2014)

Figura 5. 1 - Diagrama unifilar do alimentador “Aparecida 3”.



Fonte: Eletrobras Amazonas Energia, (2014).

Por simplicidade, este comportamento da carga é considerado igual para todas as cargas do circuito (lineares e não lineares), não obstante o método possa representar um comportamento diferente para cada carga.

Todas as barras de média tensão (1 – 69) com exceção da barra da fonte (0) foram consideradas como localização possível para os equipamentos compensadores de potência reativa a serem selecionados.

Para determinar o custo de operação anual do alimentador foram empregados os coeficientes de custo (Custo da demanda $c_D = 120$ \$/kW e Custo da energia $c_E = 0,015$ \$/kWh) utilizados em (GRAINGER, 1986).

A avaliação do valor presente líquido foi realizada considerando 10 anos como período de avaliação do projeto e a uma taxa de juros de 5% anual.

Para formar os compensadores de potência reativa foram empregadas unidades trifásicas de capacitores de 150 kVar. Como dados de custo dos capacitores, indutores e resistores foram utilizadas 13 \$/kVar, 250 \$/kVar e 100 \$/kW respectivamente, como em (KAWANN, 1996).

Em todos os casos, foram utilizados os limites de harmônicos de tensão da norma Prodist-módulo 8 como restrições da qualidade de energia.

O problema de otimização apresentado consiste na determinação da potência e localização no alimentador considerado, de até três bancos de capacitores e até três filtros sintonizados com quatro possíveis frequências (5° , 7° , 11° ou 13° harmônico) que minimize o (-VPL) do projeto de compensação e o máximo THD da rede em duas condições possíveis:

- 1) Caso com baixa penetração de harmônicos;
- 2) Caso com alta penetração de harmônicos.

5.3 Caso com baixa penetração de harmônicos

Neste caso considera-se que a carga não-linear é 10% da carga linear em cada barra do sistema. Os resultados iniciais do problema (caso base sem compensadores) são apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Resultados iniciais

Parâmetro	Valor
Custo de operação (\$/ano)	26.466,00
Máximo <i>DTT</i> (%)	1,79
Máximo <i>DITh</i> (%)	1,52
Fator de potência	0,89

Como parte da solução calculada para este caso inicial, determinaram-se as tensões e os índices de distorção total (*DTT*) e individual (*DITh*) da tensão para os três estados de carga considerados (1, 2 e 3). Tendo em conta a numeração empregada para os nós da rede (figura 5.1), determinaram-se os perfis de tensão (figura 5.2), do *DTT* (figura 5.3) e do *DITh* (figura 5.4) para cada estado de carga os quais são mostrados nas respectivas figuras.

O perfil de tensões para os três estados de carga que se consideram (figura 5.2), mostra como a tensão se reduz do nó fonte até os nós finais do circuito, mas se mantendo entre os valores 99% para o estado (3) de carga mínima e 96.5% para o estado (1) de máxima carga.

Por sua parte, o *DTT* se incrementa da fonte até os nós finais do circuito, mantendo-se entre os valores 1,79% para o estado (1) de máxima carga e 0,53% para o estado (3) de mínima carga.

Figura 5. 2 - Perfil de tensões para os três estados de carga.

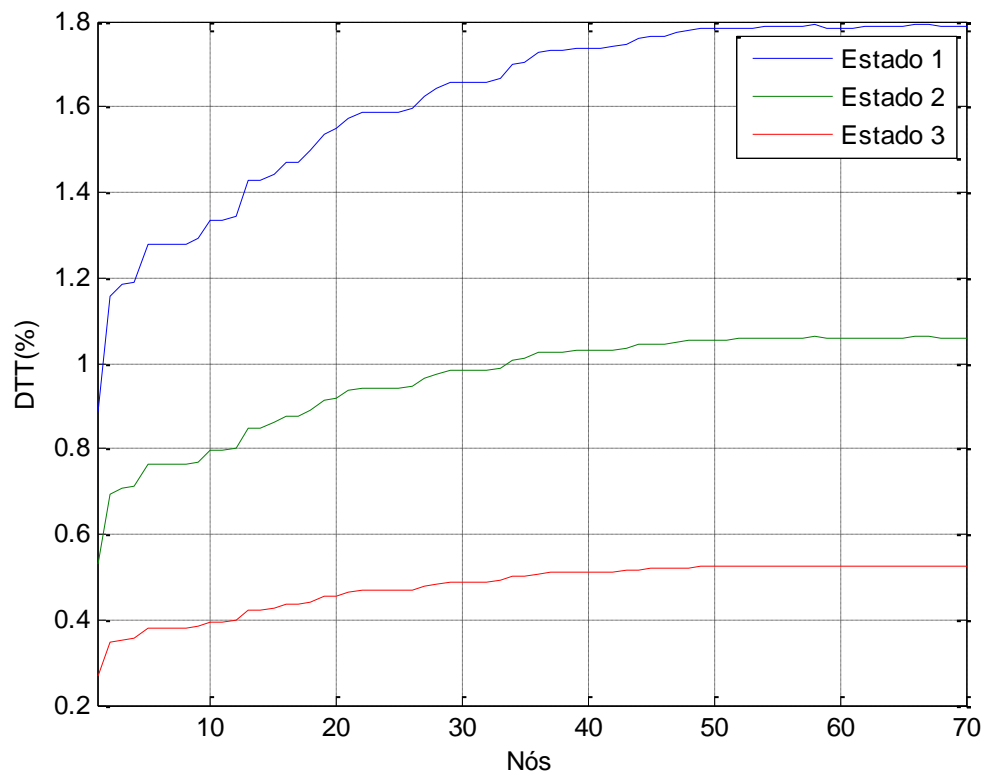
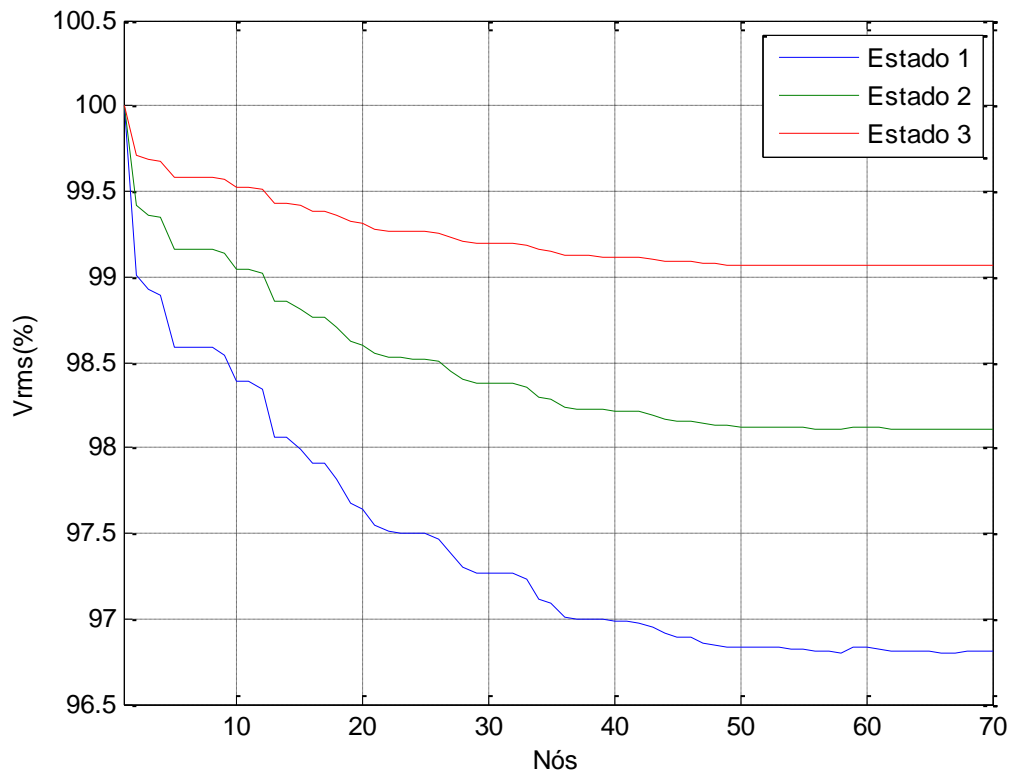


Figura 5. 3 - Perfil do DTT para os três estados de carga.

Uma amostra dos perfis do *DITH* dos distintos harmônicos para o estado de máxima carga se apresenta na figura 5.4

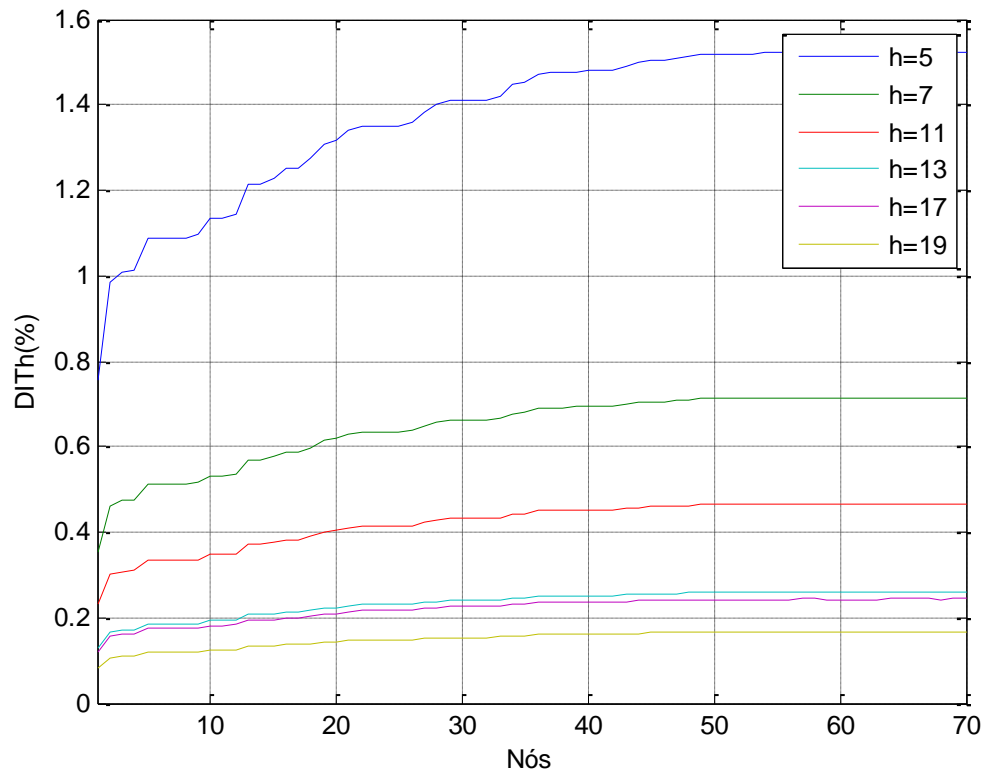


Figura 5. 4 - Perfis do *DITH* dos distintos harmônicos para o estado de máxima carga e para os três estados de carga.

Segundo a norma PRODIST-Módulo 8 estes índices de distorção se encontram dentro dos limites normalizados para este nível de tensão. Antes de determinar as soluções de compensação para o problema exposto, vão ser analisadas algumas características do programa de otimização desenvolvido, tais como:

- 1) Convergência das soluções;
- 2) Influência do número de gerações;
- 3) Influência do tamanho da população.

A convergência das soluções consiste na capacidade do algoritmo de reproduzir soluções semelhantes em execuções repetidas do algoritmo. Esta análise é importante no caso dos algoritmos genéticos, já que a natureza aleatória da reprodução provoca variações de uma execução a outra. Na medida em que estas variações sejam menores pode se ter mais

confiança nas soluções selecionadas da fronteira de Pareto determinada por uma execução do algoritmo, como mostra a figura 5.5.

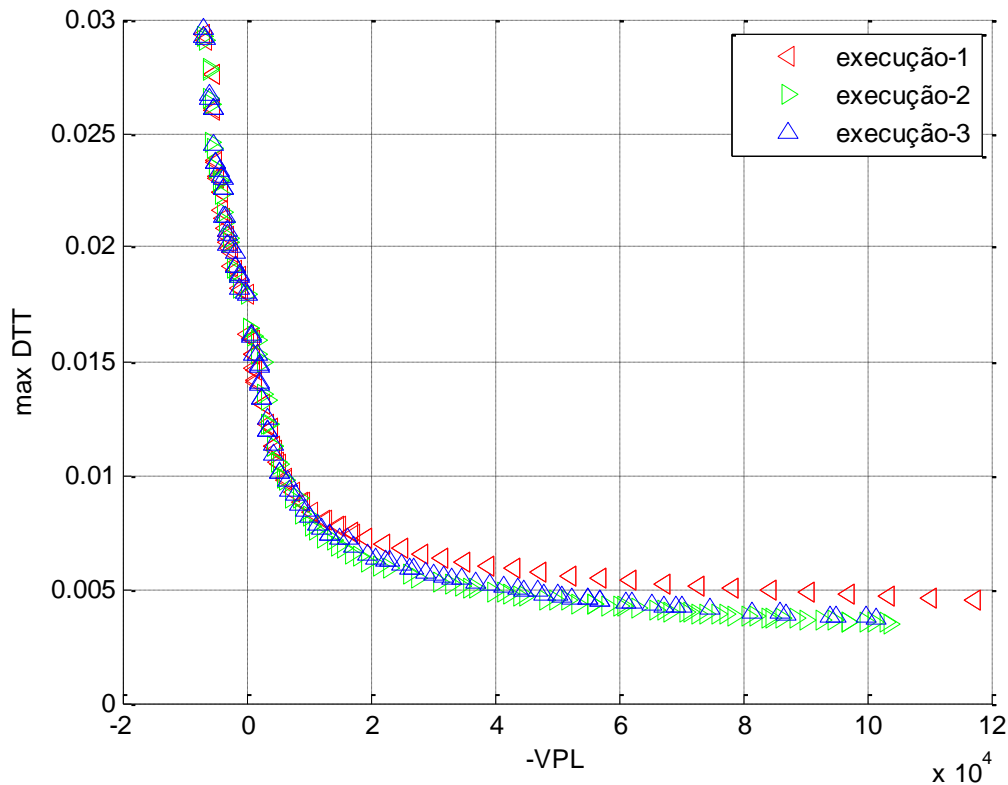


Figura 5. 5 - Convergência das soluções (população = 100, gerações = 150).

Como se pode observar na figura 5.5, há uma correspondência muito boa entre as frentes de Pareto obtidas por três execuções, independentes do algoritmo com uma população de 100 indivíduos e 150 gerações.

Outro aspecto a ser considerado é a influência na qualidade da resposta do número de gerações que realiza o algoritmo. Espera-se que com o maior número de gerações, os mecanismos evolutivos do NSGA-II possam obter uma melhor fronteira de Pareto, não obstante, deve-se levar em conta o aumento do tempo de execução.

A figura 5.6 mostra a evolução da fronteira de Pareto em uma mesma execução do algoritmo com população de 100 indivíduos a 50, 100 e 150 gerações respectivamente.

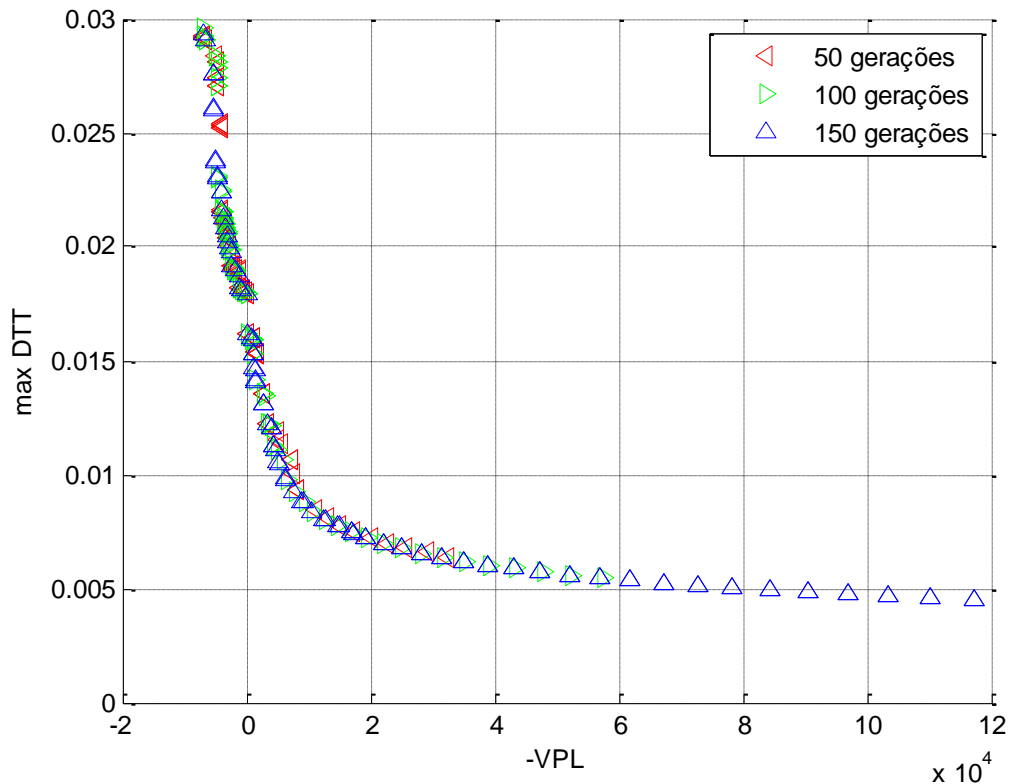


Figura 5. 6 - Influência do número de gerações (população = 100).

O tamanho da população tem também uma influência importante na qualidade das respostas obtidas. A utilização de uma população maior permite realizar uma exploração mais ampla das soluções e incrementa a possibilidade de encontrar soluções factíveis do começo da otimização. Não obstante, uma grande população incrementa substancialmente o tempo de execução do algoritmo.

A figura 5.7 mostra as fronteiras de Pareto obtidas com 150 gerações do algoritmo, com populações de 50, 100 e 150 indivíduos respectivamente.

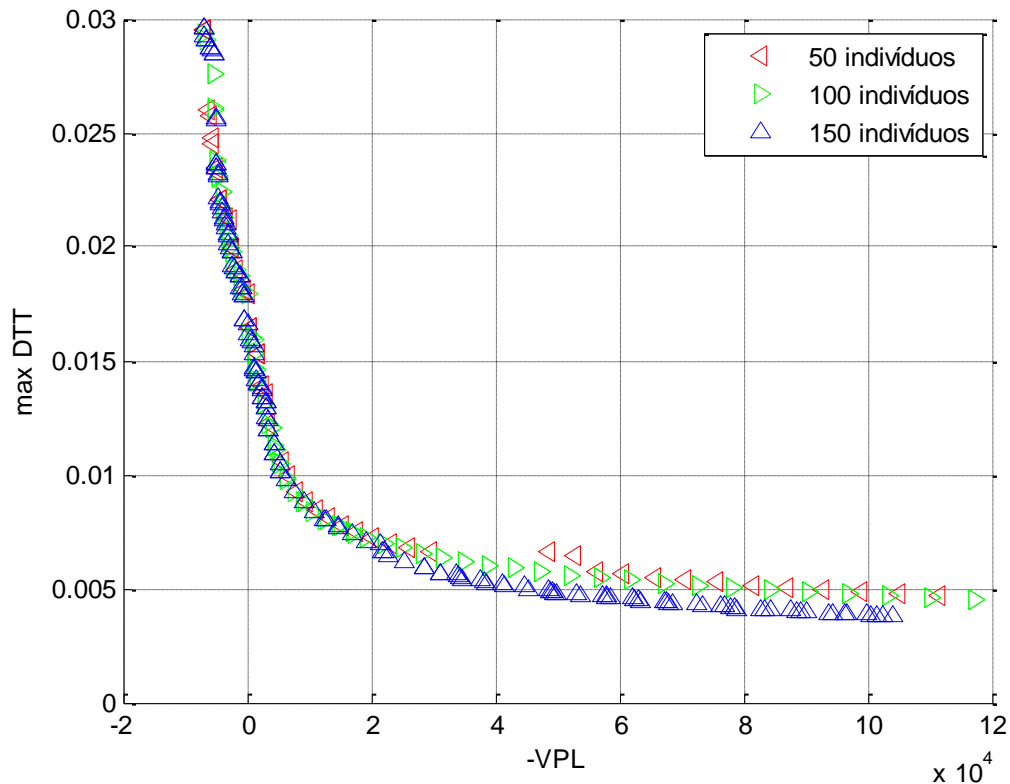


Figura 5. 7 - Influência do tamanho da população (gerações = 150).

Para se ter uma ideia da influência do número de indivíduos da população e o número de gerações sobre o tempo de execução do algoritmo, na tabela 5.3 mostra-se o tempo em minutos para as execuções realizadas nos exemplos apresentados. Empregou-se um notebook Toshiba Satellite-Pro (Intel(R) Core (TM)2 Duo CPU T5870@ 2.00 GHz, 1.87 GB of RAM).

Conforme apresenta a tabela 5.3, o efeito de ambos os parâmetros no tempo é aproximadamente igual, com um valor médio de 0,48-0,51 seg./($\text{população} \times \text{gerações}$) para este exemplo.

Tabela 5. 3 - Tempo de execução (minutos)

População	Gerações		
	50	100	150
50	20,18	40,96	61,48
100	46,05	90,08	137,22
150	66,04	125,32	190,38

Obtida a fronteira de Pareto do problema, podem-se utilizar diferentes critérios para escolher a solução desejada. As soluções do VPL positivo são economicamente factíveis, mas têm o pior comportamento quanto à distorção harmônica, não obstante, são aconselháveis sempre que se atendam as restrições do problema. Entretanto, as soluções com o VPL

negativo só seriam recomendáveis nos casos que for necessário diminuir a distorção para atender as restrições pertinentes.

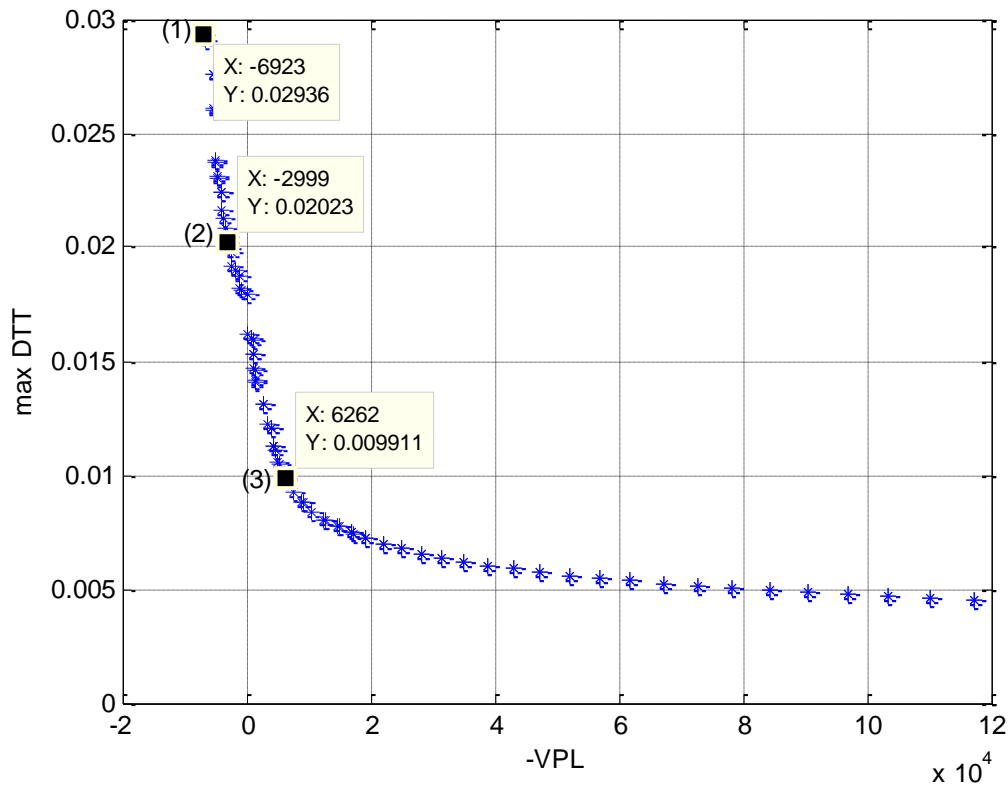


Figura 5. 8 - Fronteira de Pareto (população = 100, gerações = 150).

Por exemplo, para a fronteira de Pareto da figura 5.8, as soluções (1) e (2) têm *VPL* positivo e, portanto produzem economias pela redução dos custos de operação anuais, enquanto que a solução (3) que é melhor do ponto de vista de qualidade da energia não produz economias e, portanto, somente se aplicaria se fosse desejado reduzir o max *DTT* a apenas 1%.

A tabela 5.4 apresenta os dados dos parâmetros selecionados das soluções (1), (2) e (3). Das três variantes mostradas, a variante (1) com um total de 1.350 kVar instalados é a que mais incrementa a tensão no circuito. Não obstante, como pode apreciar-se na figura 5.9, este incremento não excede a tensão nominal em nenhum estado de carga.

Um aspecto que pode saltar à vista quando se examina a tabela 5.4, é que tanto a solução (1) como a (2), longe de reduzir o *DTT* e o *DIT_h*, incrementam esses índices com respeito a seus valores iniciais. Para aprofundar na análise desta situação vão se comparar os perfis do *DTT* obtidos pela solução (1) com respeito aos perfis iniciais do circuito do exemplo.

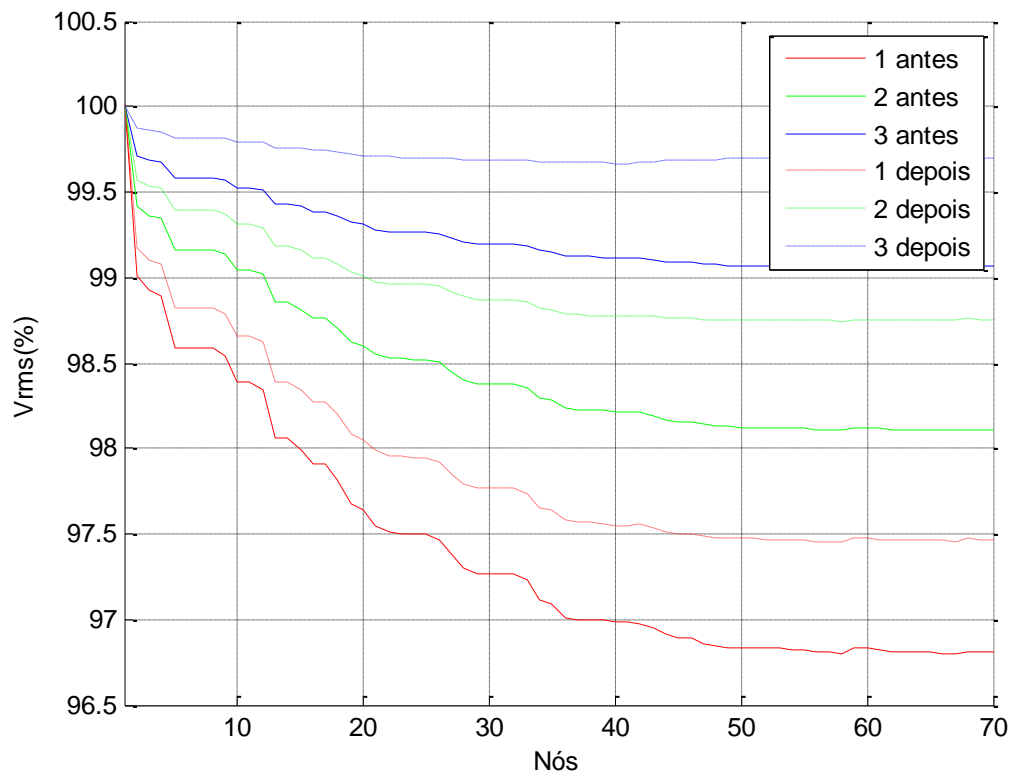


Figura 5. 9 - Perfis de tensão para os três estados de carga, antes e depois de aplicada a solução (1)

Tabela 5. 4 - Parâmetros das soluções selecionadas

Parâmetro	Solução (1)		Solução (2)		Solução (3)	
Investimento (\$)	17.550		6.857		25.299	
Operação (\$/ano)	23.297		25.190		24.001	
VPL (\$)	6.923		2.999		-6.262	
Máximo THD (%)	2,93		2.02		0.99	
Máximo IHD (%)	2.11		1.72		0.66	
Fator de potência	0.97		0.92		0.95	
Localização e dados dos compensadores	Nós	Dados	Nós	Dados	Nós	Dados
	50	150 kVar capacitor	62	300 kVar fs = 10.4 Q = 30.6	57	900 kVar fs = 4.7 Q = 48.8
	56	450 kVar capacitor	63	150 kVar capacitor		
	67	750 kVar capacitor				

Onde: fs- frequência de sintonia (pu), Q- fator de qualidade.

Os perfis do *DTT* para os distintos estados de carga, antes e depois de aplicada a solução (1) mostram-se na figura 5.10.

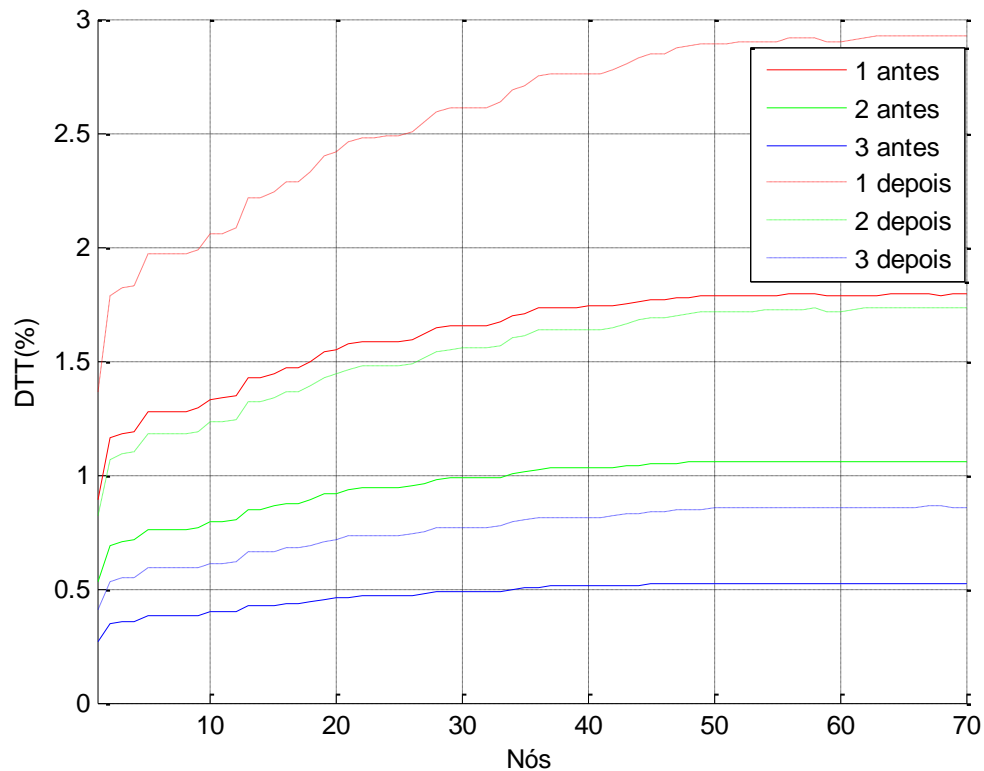


Figura 5. 10 - Perfis do *DTT* para os três estados de carga, antes e depois de aplicada a solução (1)

O incremento observado no *DTT* e o *DITH* obedecem ao efeito dos bancos de capacitores empregados nesta solução, já que é conhecido que os capacitores tendem a incrementar os índices de distorção em circuitos poluídos por harmônicos. Este incremento deve entender-se não como um problema do algoritmo, mas sim como uma vantagem do mesmo, já que de entre todas as soluções de compensação com capacitores, algumas das quais podem incluir ressonâncias a determinados harmônicos, este algoritmo é capaz de encontrar soluções que cumprem as restrições de distorção por harmônicos e têm um grande impacto econômico.

No caso das soluções formadas por filtros harmônicos, como é o caso da solução (3), os índices de distorção *DTT* e *DITH* devem reduzir-se apreciavelmente, já que esta é a função fundamental de tais filtros. Este comportamento pode observar-se na figura 5.11 para os distintos estados de carga nos perfis do *DTT* calculados antes e depois de aplicada a solução (3).

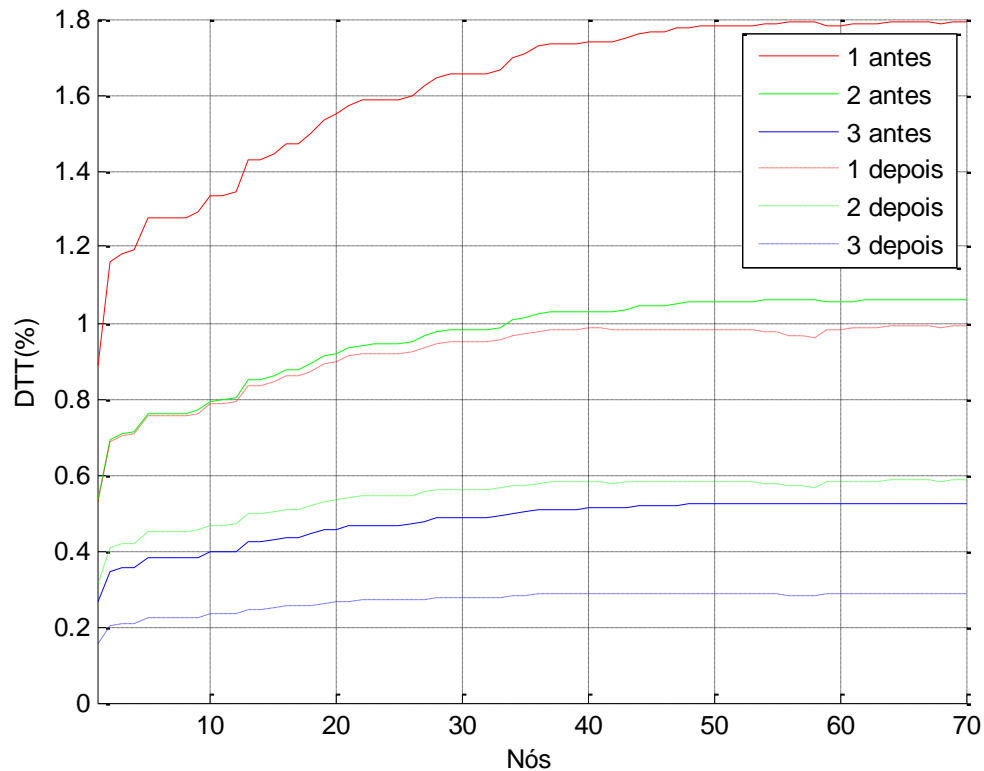


Figura 5. 11 - Perfis do *DTT* para os três estados de carga, antes e depois de aplicada a solução (3)

Entretanto, a solução (3) que tão bom comportamento tem em relação à distorção, tem um desempenho muito inferior à (1) com respeito à efetividade econômica da mesma. O algoritmo apresentado tem a vantagem de determinar uma gama ampla de soluções de diversos comportamentos em ambas as funções objetivo que podem ser escolhidas livremente pelo engenheiro de acordo aos critérios que se aplicam em cada situação.

Realizou-se outro teste com o programa, neste caso para determinar a localização na rede de até seis compensadores de potência reativa para minimizar as funções objetivo do problema, mas fixando em cada caso o tipo de compensador desejado: capacitores, filtros sintonizados ou filtros de segunda ordem.

Os resultados deste teste são mostrados na figura 5.12, onde se pode comprovar que fundamentalmente as soluções com capacitores são as mais econômicas e as de menor efetividade com respeito à distorção, enquanto que as soluções com filtro, como era de se esperar, localizam-se na zona de baixa distorção e pior desempenho econômico.

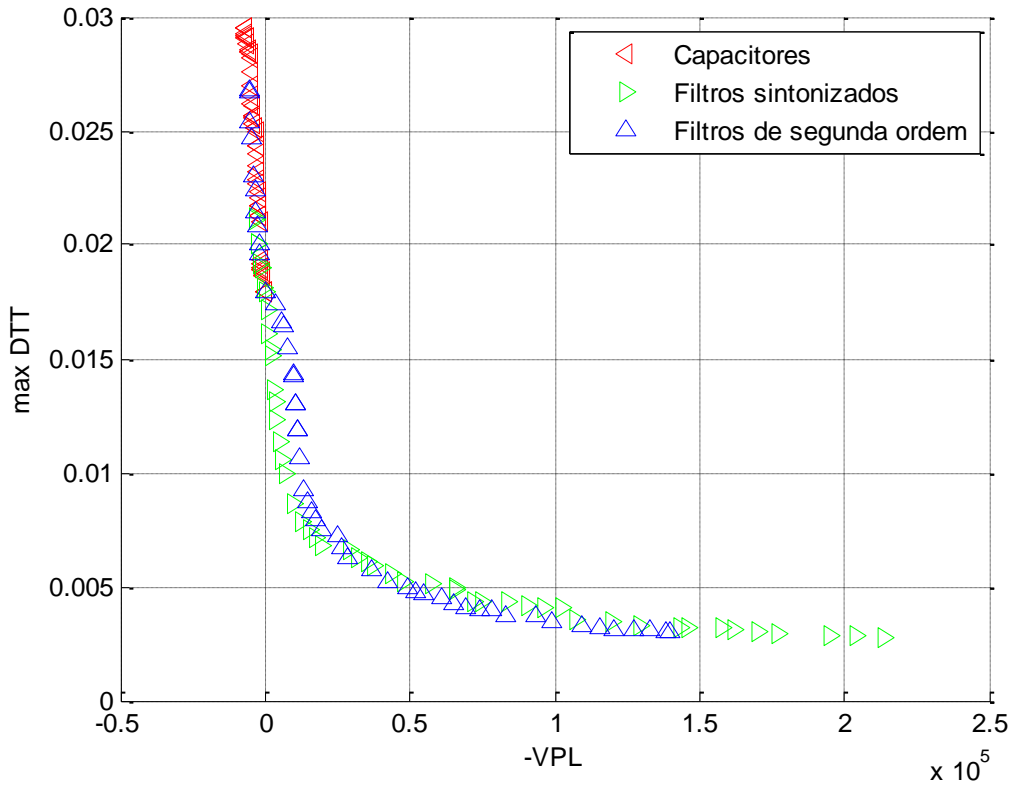


Figura 5. 12 - Fronteiras de Pareto (população = 50, gerações = 150).

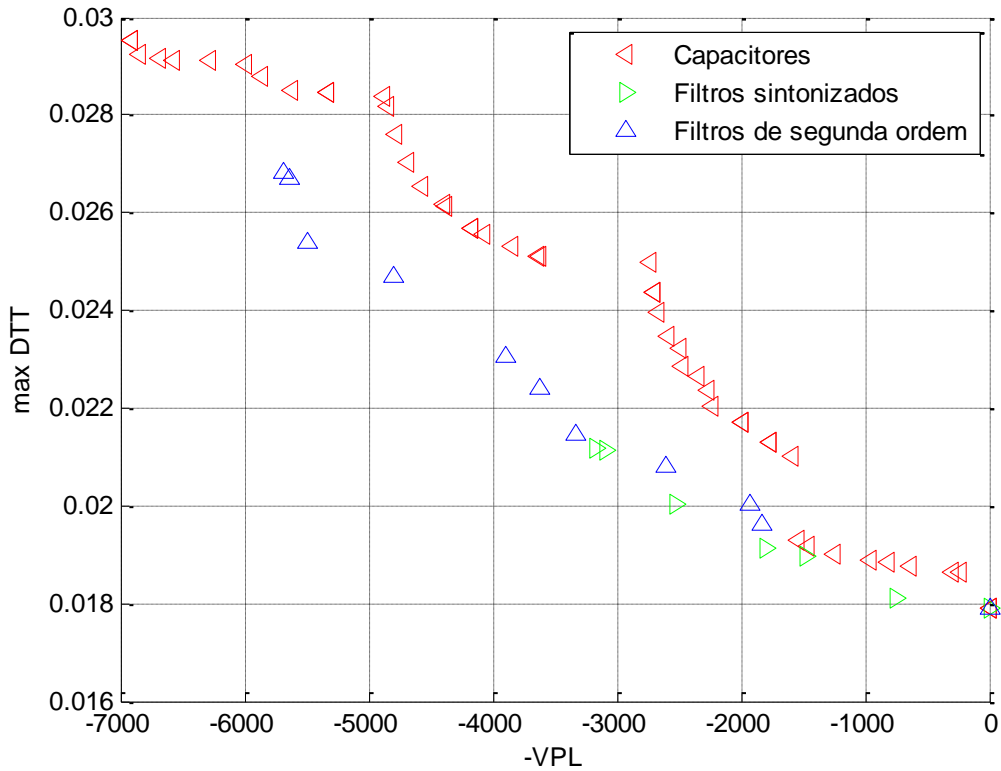


Figura 5.13 - Fronteiras de Pareto ($VPL \geq 0$, população = 50, gerações = 150).

Um fato interessante é que se podem encontrar soluções com filtros (sobretudo de segunda ordem), que têm melhor *VPL* do que as soluções com capacitores para o mesmo *DTT* máximo como mostra a figura 5.13.

5.4 Caso com alta penetração harmônica

Neste caso se parte da rede elétrica exemplo, considerando que a carga não-linear é 40% da carga linear em cada barra do sistema. Os resultados iniciais do problema (caso base sem compensadores) são apresentados na tabela 5.5.

Tabela 5. 5 - Resultados iniciais (caso 2)

Parâmetro	Valor
Custo de operação (\$/ano)	27,468
Máximo <i>DTT</i> (%)	7.24
Máximo <i>DITH</i> (%)	6.16
Fator de potência	0.89

Segundo o Prodist-Módulo 8 o máximo *DITH* está fora dos limites normatizados para este nível de tensão. Neste caso, antes de se fazer as considerações econômicas do problema, o primeiro resultado da otimização deve ser a obtenção do grupo de soluções factíveis do ponto de vista da qualidade da energia e de estresse dos capacitores, que minimizem ambas funções objetivo.

A figura 5.14 mostra a fronteira de Pareto deste caso em que se comprova que todas as soluções caem na zona com o *VPL* negativo, quer dizer, estes são investimentos que não se pagam no tempo estabelecido, mas que são necessárias para cumprir as restrições de qualidade do problema e minimizar a distorção presente na rede.

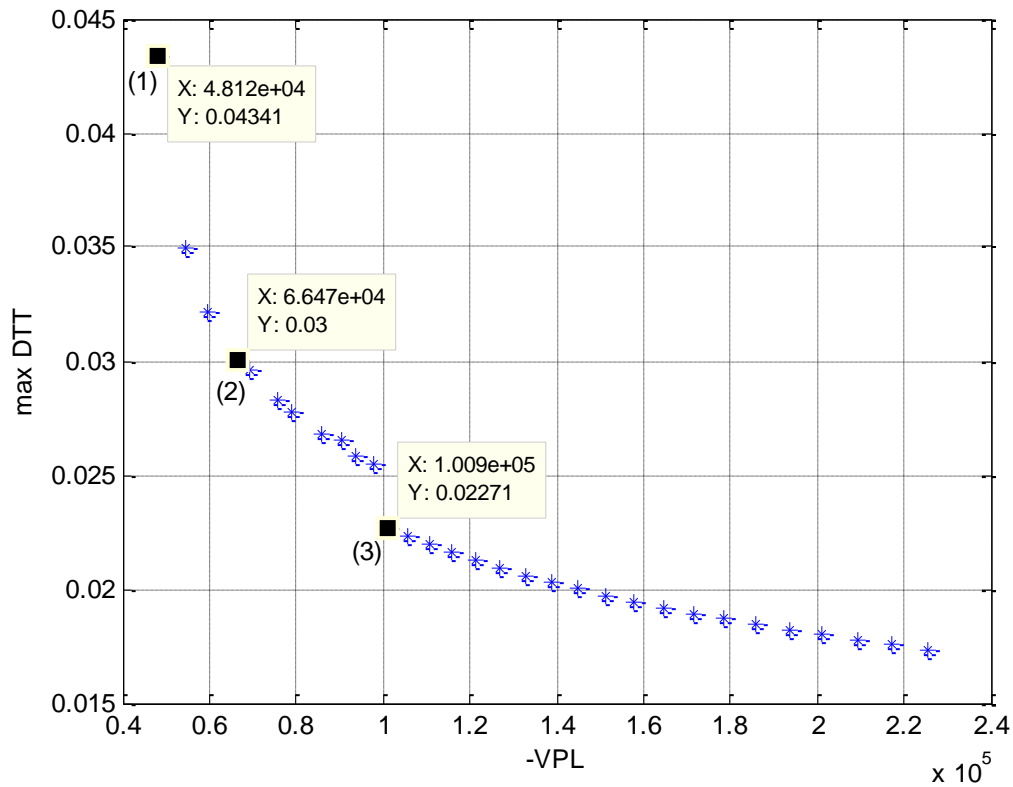


Figura 5. 13 - Fronteira de Pareto (população = 50, gerações = 150)

A localização e os outros dados dos compensadores que formam as três soluções selecionadas na figura 5.14 são apresentados na tabela 5.6.

Tabela 5. 6 - Parâmetros das soluções selecionadas

Parâmetro	Solução (1)		Solução (2)		Solução (3)	
Investimento (\$)	67122		102092		133929	
Operação (\$/ano)	25008		22855		23186	
VPL (\$)	-48123		-66473		-100865	
Máximo DTT (%)	4.34		3.00		2.27	
Máximo DITh (%)	3.03		1.80		1.33	
Fator de potência	0.96		0.99		(c)0.93	
Localização e dados dos compensadores	Nós	Dados	Nós	Dados	Nós	Dados
	24	1050 kvar fs = 4.7 Q = 50	21	2850 kvar fs = 4.7 Q = 50	28	4350 kvar fs = 4.7 Q = 46

Onde: fs- frequência de sintonia (pu), Q- fator de qualidade

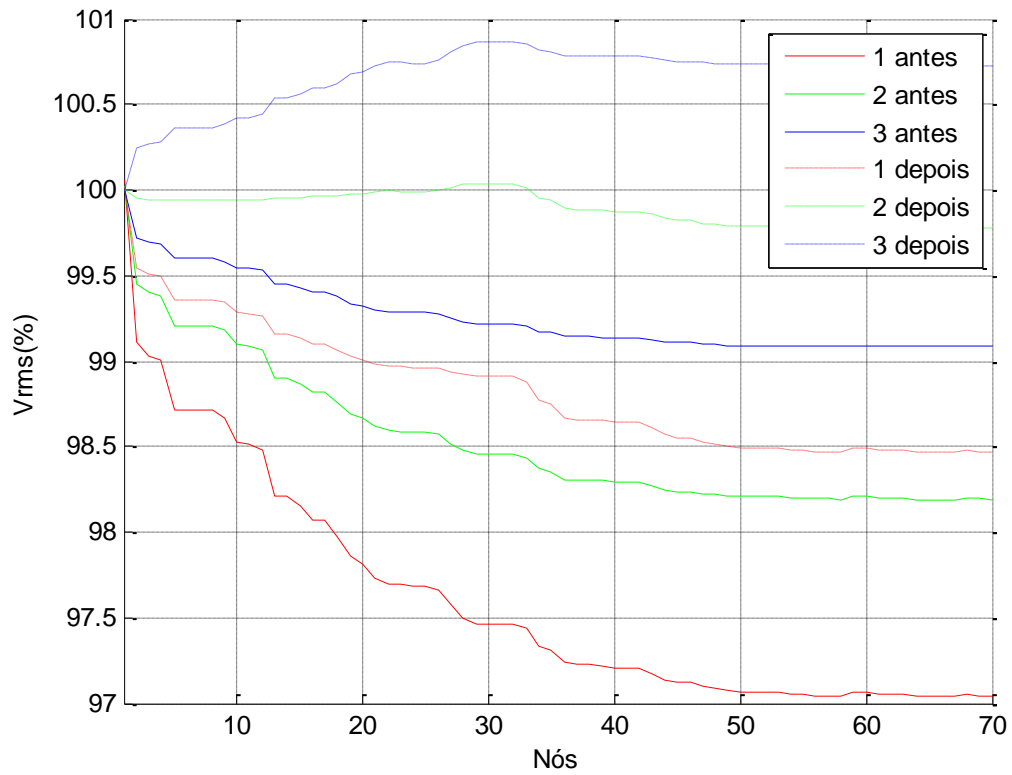


Figura 5.15 - Perfis de tensão antes e depois de aplicada a solução (3)

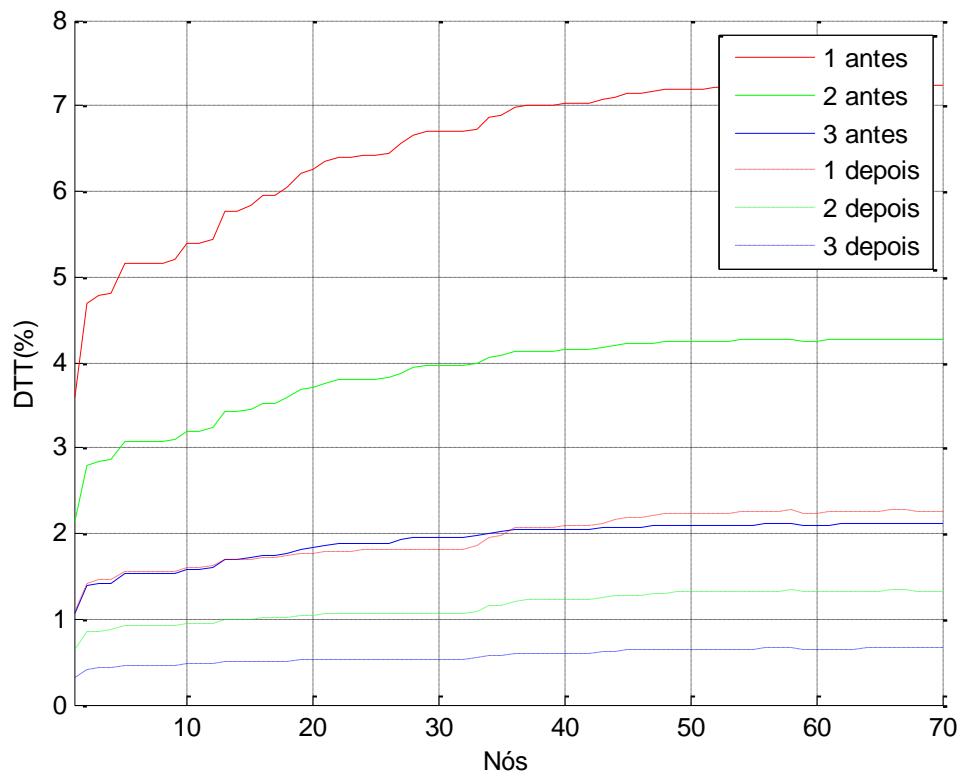


Figura 5. 14 - Perfis do DTT antes e depois de aplicada a solução (3)

Neste caso, a solução (3) é a de maior compensação com um grande filtro de 4.350 kVar. Entretanto, para esta solução a tensão no estado (3) de mínima carga não supera o 101% da tensão nominal como pode ver-se na figura 5.15.

Por sua parte, a figura 5.16 mostra a grande redução que experimenta o *DTT* quando se instala o filtro da solução (3).

Como é lógico os resultados que se obtêm com o programa dependem totalmente dos dados empregados no exemplo que se analisa. Se variarem os custos de operação da rede, os custos dos capacitores e os filtros, os dados para a avaliação econômica do VPL ou os próprios dados da rede, as cargas e seu comportamento, etc., obter-se-ão outros resultados.

Se por exemplo, diminui-se o fator de potência dá carga a 0,75 e se reduzem os coeficientes de custo de capacitores, indutores e resistores a 50% de seus valores iniciais, obtêm-se uma variante do caso de alta penetração que tem os seguintes resultados iniciais.

Tabela 5. 7 - Resultados iniciais (caso 2 modificado)

Parâmetro	Valor
Custo de operação (\$/ano)	27,607
Máximo <i>DTT</i> (%)	7.34
Máximo <i>DITh</i> (%)	6.24
Fator de potência	0.74

A fronteira do Pareto deste caso (Figura 5.16) contém soluções com o *VPL* positivo e, portanto efetivas do ponto de vista econômico.

Para a solução assinalada na figura 5.17, obter-se-iam os seguintes resultados:

Tabela 5. 8 - Parâmetros da solução assinalada

Parâmetro	Solução (1)	
Investimento (\$)	52597	
Operação (\$/ano)	18361	
VPL (\$)	18794	
Máximo <i>DTT</i> (%)	2.43	
Máximo <i>DITh</i> (%)	1.43	
Fator de potência	0.98	
Localização e dados dos compensadores	Nós	Dados
	58	3000 kvar
		fs = 4.7 Q = 18

Onde: fs- frequência de sintonia (pu), Q- fator de qualidade

Finalmente, na figura 5.18 se observa a grande diminuição do *DTT* que se consegue mediante a aplicação da solução da tabela 5.8.

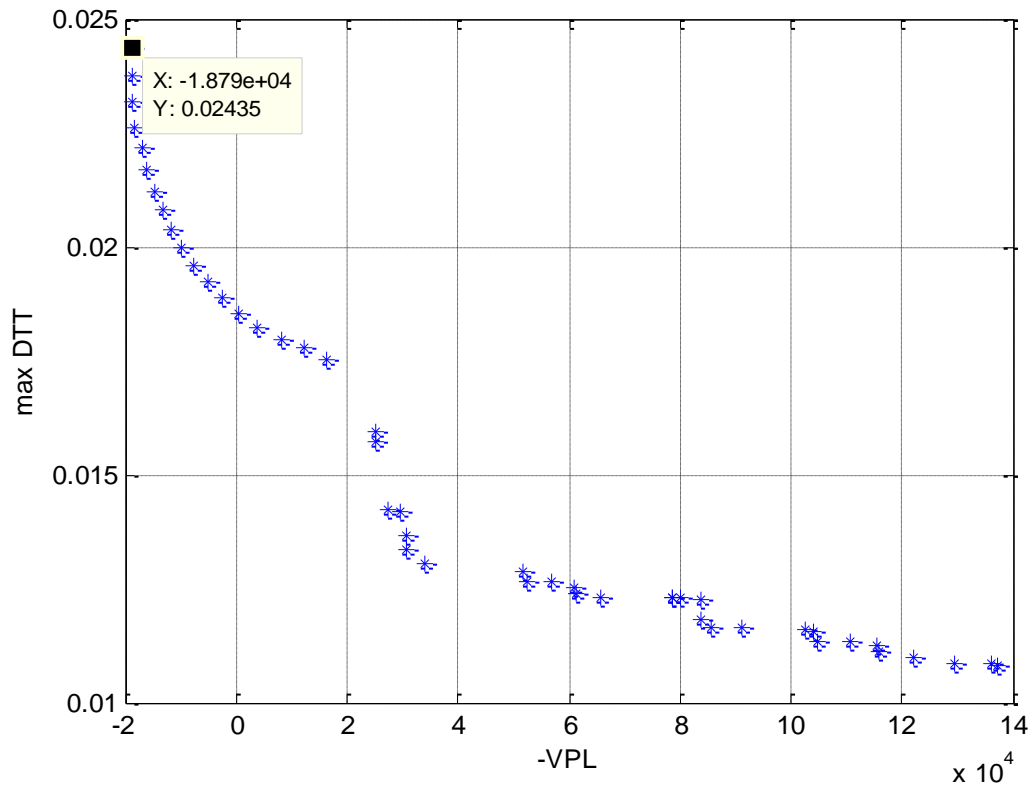


Figura 5. 15 - Fronteira de Pareto (população = 50, gerações = 50)

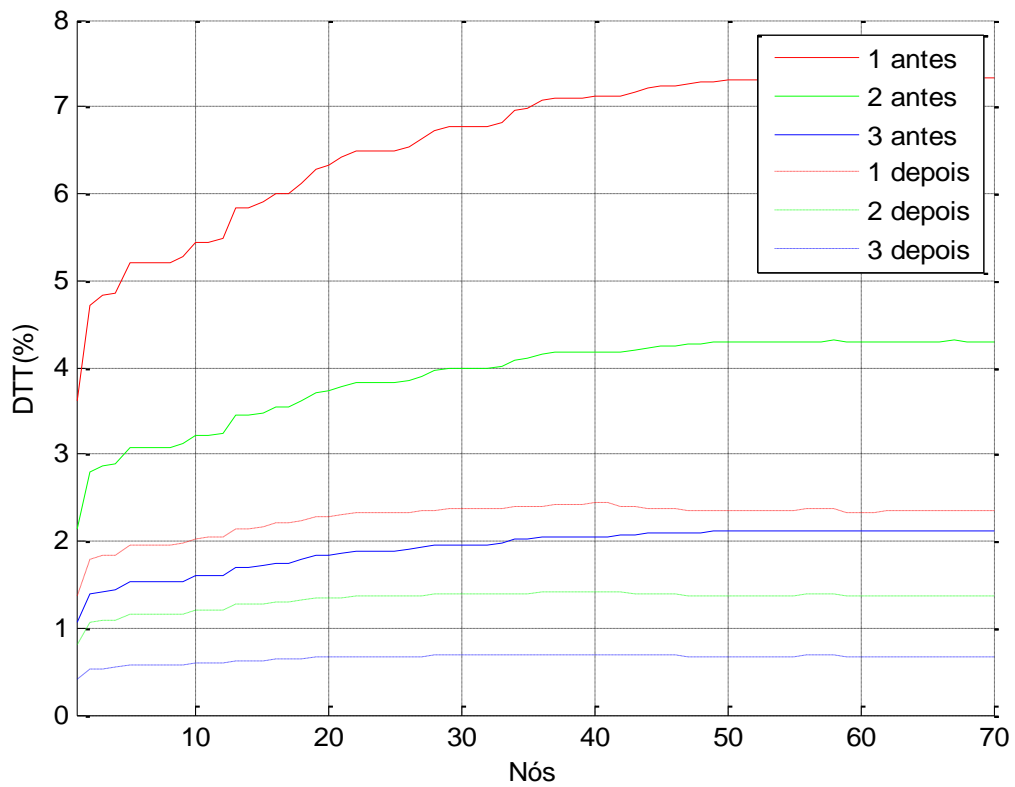


Figura 5. 16 - Perfis do *DTT* antes e depois de aplicada a solução

5.5 Considerações finais

A partir dos resultados obtidos nas simulações realizadas, pode-se chegar às seguintes conclusões sobre o uso do procedimento proposto:

- 1) O algoritmo utilizado mostrou a capacidade de produzir resultados semelhantes para diferentes execuções sucessivas do mesmo problema, ou seja, que com uma população adequada e um número suficiente de gerações, pode-se garantir a convergência à fronteira de Pareto do problema;
- 2) As soluções obtidas não necessariamente são ótimas já que um algoritmo genético não assegura a determinação do ótimo absoluto. Não obstante sempre o algoritmo produzirá um conjunto de boas soluções para o problema;
- 3) O tempo de execução deste tipo de algoritmos é relativamente elevado, por isso recomenda-se avaliar a possibilidade de melhorar a implementação computacional dos procedimentos de avaliação da função objetivo e restrições para assegurar a maior rapidez nos cálculos;
- 4) As soluções obtidas que utilizam filtros sintonizados devem ser analisadas para diferentes condições de depreciação da capacitância e indutância dos filtros e desta forma julgar corretamente o desempenho dos filtros selecionados.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

O problema de otimização da potência reativa em sistemas elétricos de distribuição foi formulado como um problema multicritério que considera os benefícios econômicos da compensação na operação das redes elétricas e a redução da distorção por harmônicos no sistema. Além disso, a formulação apresentada considera as restrições relevantes impostas pelas normas brasileiras.

A ferramenta computacional para resolver esta formulação se conseguiu mediante o algoritmo NSGA-II, que determina as soluções ótimas de Pareto para o problema e permite ao especialista determinar as soluções mais efetivas.

O algoritmo desenvolvido apresenta várias novidades para este problema podendo-se citar:

- 1) É capaz de resolver dois tipos de problemas multiobjetivo: de dois ou três objetivos conforme seja selecionado pelo especialista;
- 2) Determina o número e a localização dos diferentes compensadores de potência reativa na rede elétrica sem importar o tipo de configuração (pode ser radial ou em malha);
- 3) Permite determinar a compensação de potência reativa com capacitores em sistemas com certa penetração harmônica sem violar as normas de qualidade da energia pertinentes;
- 4) Permite empregar filtros harmônicos passivos do tipo sintonizado ou de segunda ordem para compensar a potência reativa em sistemas com alta penetração de harmônicos, selecionando as frequências e fatores de qualidade desses filtros;
- 5) Tem as recomendações do PRODIST-Módulo 8 incorporadas para verificar as restrições de qualidade da energia correspondentes;
- 6) Considera um conjunto de estados de carga para as cargas lineares e não lineares que podem representar o comportamento diário característico das cargas;
- 7) As cargas não lineares podem ser representadas por diferentes padrões de harmônicos de acordo com as medições que se realizem nas mesmas;

- 8) As implementações de fluxo de potência à frequência fundamental e de fluxo de potência para harmônicos se desenvolveram utilizando técnicas de modificação da matriz impedância de barras para diminuir o tempo de execução do programa.

Os resultados positivos desta tese, a partir da análise de vários exemplos práticos, mostram as vantagens do método desenvolvido.

6.2 Recomendações

A partir dos resultados obtidos até o momento, podem-se considerar os seguintes passos futuros:

- 1) Determinar padrões harmônicos característicos para as cargas não lineares comuns nos sistemas de distribuição brasileiros;
- 2) Determinar padrões de comportamento diário característicos para as cargas presentes nos sistemas de distribuição brasileiros;
- 3) Desenvolver novas técnicas para diminuir o tempo de execução do algoritmo desenvolvido.

REFERÊNCIAS

ABDOLLAH KAVOUSI-FARD, TAHER NIKNAM. **Considering uncertainty in the multi-objective stochastic capacitor allocation problem using a novel self adaptive modification approach.** *Electric Power Systems Research, Volume 103, October 2013, Pages 16-27.*

AHMED R. ABUL'WAFI. **Optimal capacitor allocation in radial distribution systems for loss reduction: A two stage method.** *Electric Power Systems Research, Volume 95, February 2013, Pages 168-174.*

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica.** Resolução Normativa nº 395/2009, Data de vigência: 01/01/2010.

AMAVEL L., ALEX-SANDER AND CARDOSO FILHO, BRAZ JESUS. **Minimum Reactive Power Filter Design for High Power Converters.** 13th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC, 2008.

ARRILLAGA, and WATSON, N.R. **Power Systems Harmonics.** 2a. Ed. John Wiley e Sons, Ltd U.S.A. 2003.

ABRIL, P. I.; GONZÁLEZ, Q. J. A., “**VAR Compensation by Sequential Quadratic Programming,**” IEEE Transactions on Power Systems, Vol.18 , No.1, pp. 36-41, February 2003.

ABRIL, P. I. **Compensación de potencia reactiva en sistemas industriales mediante bancos de capacitores.** Tesis de doctorado. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, 1994.

ABRIL, P. I. **Cálculo de parámetros de filtros pasivos de armónicos.** Revista Ingeniería Energética, Nro.1, Vol. XXXIII, pp. 35-45. 2012 Citada por: SciELO.

AZEVEDO, M. S. S., BEZERRA, U. H., LEITE, J.C., ABRIL, I.P., BENITEZ, C. A. DE LEON. **Multiobjective Optimization of the Reactive Power Compensation in Electric Distribution Systems.** Revista Dyna, Medellin, Colombia, 2014.

BAGHZOUZ, Y. e ERTEM, S. (1990). **Shunt capacitor sizing for radial distribution feeders with distorted substation voltages.** IEEE Transactions on Power Delivery, 5(2): 650-657.

BARAN, M.E. and Wu, F.F. (1989). **Optimal Sizing of Capacitors Placed on a Radial Distribution System.** IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp 735-743.

CASTRO, A.O., BEZERRA, U.H, LEITE, J.C., AZEVEDO, M.S.S. **Methodology proposal for multi-objective optimization using NSGAI in industrial applications.** Industry

Applications (INDUSCON), 2012 10th IEEE/IAS International Conference On. Juiz de Fora, MG. Brazil, 2014.

CHANG, YING-PIN AND WU,CHI-JUI. **Design of Harmonic Filters Using Combined Feasible Direction Method and Differential Evolution.** International Conference on Power System Technology - POWERCON 2004 Singapore, 21-24 November 2004.

CHANG G, HUNG-LU WANG, GEN-SHENG CHUANG, AND SHOU-YUNG CHU. **Passive Harmonic Filter Planning in a Power System With Considering Probabilistic Constraints.** IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 24. No. 1. January, 2009.

CHEN Y. L. e LIU C.C. , **Optimal multi-objective VAR planning using an interactive satisfying method.** IEEE Transactions on Power Systems, 10(2), 664-670, Maio, 1995.

CHEN, T.H. AND YANG, W.C. **Modeling and analysis of three-phase four-wire distribution transformers with mid-tap on the secondary side.** International Conference on Energy Management and Power Delivery, Vol. 2, March 1998, pp. 723-727.

CHEN, YUAN-LIN. **“Optimal Multi-Objective Single-Tuned Harmonic Filter Planning.”** IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2. pp.1191. April, 2005, pp.1191.

CHENG, HAOZHONG. SASAKI, HIROSHI. YORINO NAOTO. **A New Method For Both Harmonic Voltage And Harmonic Current Suppression And Power Factor Correction In Industrial Power Systems.** Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 1995. Conference Record, Papers Presented at the 1995 Annual Meeting. IEEE. 0-7803-2479-x/95/\$4.00 0. 1995.

CHIANCA, M. P. F. **Uso de técnicas de otimização baseadas em derivadas como suporte do planejamento operacional de redes de distribuição de energia elétrica.** Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Natal, RN – Brasil, Junho de 2005.

CHING-TZONG SU , CHU-SHENG LEE. **Feeder reconfiguration and capacitor setting for loss reduction of distribution systems.** Electric Power Systems Research 58 (2001) 97–102.

CHURIO-BARBOZA, JULIO C. MAZA ORTEGA, JOSÉ M. BURGOS-PAYÁN, M. **Optimal design of passive tuned filters for time varying non-linear loads.** Proceedings of the 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives Torremolinos (Málaga), Spain, May, 2011.

COOK, R. F. **Analysis of capacitor application by load cycle.** Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Power Apparatus and Systems-Part III, PAS-78, 950-957, Oct 1959.

COOK, R. F. **Optimizing the application of shunt capacitors for reactive-volt-ampere control and loss reduction.** Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Power Apparatus and Systems -Part III, PAS-80, 430-444. Agosto, 1961.

CUNILL-SOLA, AND M SALICHS. **Study and Characterization of Waveforms From Low-Watt Compact Fluorescent Lamps With Electronic Ballasts.** IEEE Transactions on Power Delivery, VoL22, no.4 (2007), pp.2305-23.

DAS. D. **Optimal placement of capacitors in radial distribution system using a Fuzzy-GA method.** Elsevier Electrical Power and Energy Systems Vol 30 pp. 361–367. (2008).

DE SOUZA, B. A, HELTON DO N. A, and HELVIO A. F. **Microgenetic Algorithms and Fuzzy Logic Applied to the Optimal Placement of Capacitor Banks in Distribution Networks.** IEEE Transactions on Power Systems, 2004.

DUGAN, ROGER C., MARK F. MCGRANAGHAN, SURYA SANTOSO, H. WAYNE BEATY. **Electrical Power Systems Quality.** Second Edition, 2004.

DURAN, H., 1968. **Optimum Number, Location and Size of Shunt Capacitors in Radial Distribution Feeders.** IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol.87, no.9, pp. 1769-1774.

ERTAY, M. MUSTAFA. TOSUN, SALIH. TURKEY, DUZCE, ZENGIN, AHMET. **Simulated Annealing Based Passive Power Filter Design for a Medium Voltage Power System.** International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA). ISBN 978-1-4673-1448-0/12/\$31.00 ©2012 IEEE. 2-4 July 2012.

FERGANY, A.A. **Optimal capacitor allocations using evolutionary algorithms.** Generation, Transmission e Distribution, IET Publication Year: 2013.

GALLEGO, R. A., ALCIR JOSÉ MONTICELLI, AND RUBÉN ROMERO. **Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Networks.** IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, no. 4, November 2001.

GHOSE, T., GOSWAMI, S. K., BASU, S. K. **Energy Loss Reduction in Distribution System by Capacitor Placement Through Combined GA-SA Technique.** 1998 IEEE Region 10 International Conference on Global Connectivity in Energy, Computer, Communication and Control, TENCON '98, vol. 2, pp. 502–505, 17–19 Dec. 1998.

GOSWAMI, S. K. e BASU, S. K. (1992). **A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization.** *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 7, no. 3, pp. 1484-1491.

GRAINGER, J. AND S. H. LEE. **Capacity release by shunt capacitor placement on distribution feeder: A new voltage-dependent model.** *IEEE Trans. Power Application Systems.*, vol. -101, no. 5, pp. 1236–1244, May 1982.

HAO YUE, GENGYIN LI, MING ZHOU. **Multi-objective Optimal Power Filter Planning in Distribution Network Based on Fast Nondominated Sorting Genetic Algorithms.** ISBN 978-1-4577-0365-2/11 ©2011 IEEE.

HE N., LINA HUANG, JIAN WU, DIANGUO XU. **The Application of Particle Swarm Optimization to Passive and Hybrid Active Power Filter Design.** IEEE Transactions on Power Electronics. Vol. 56, No. 8, August 2009 pp.2841.

HONG, YING-YI AND CHIU, CHING-SHENG. **Passive Filter Planning Using Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 2, April. pp 939, 2010.

HSIAO, YING-TUNG TAMKANG. **Design of Filters for Reducing Harmonic Distortion and Correcting Power Factor in Industrial Distribution Systems**. Journal of Science and Engineering. Vol. 4, No. 3, pp. 193-199. 2001.

HUANG L., AND DIANGUO XU. **Optimal Design for Passive Power Filters in Hybrid Power Filter Based on Particle Swarm Optimization**. Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang Province, China, huanglina991@163.com. Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics August 18-21. JINAN, CHINA, 2007.

IEC/TR 61000-3-6, Edition 2.0 2008-02, TECHNICAL REPORT: Electromagnetic compatibility (EMC) –Part 3-6: Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV Power Systems.

IEEE **Guide for Application and Specification of Harmonic Filters**, IEEE Std 1531-2003.

IEEE **Standard for Shunt Power Capacitors**. IEEE Standard 18-2002, 2003.

IEEE Std 519-1992. “**IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**,” Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., (2004).

JIANG, D. AND BALDICK, R. May, 1996. **Optimal Electric Distribution System Switch Reconfiguration and Capacitor Control**. IEEE Transactions on Power Systems, 11(2): 890-897.

JWO, W. S, LIU, C.W., LIU, C.C., HSIAO, Y.T. **Hybrid expert system and simulated annealing approach to optimal reactive power planning**. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 142(4), 381-385 Julho 1995.

JUNPENG, JI. Haiwa Liu, Guang Zeng, Jinggang Zhang. **The Multi-objective Optimization Design of Passive Power Filter Based on PSO**. Department of Electrical Engineering, Xi’an University of Technology, XUT, Xi’an, China, jijunpeng@xaut.edu.cn, 378451066@qq.com, g-zeng@mail.xaut.edu.cn. ISBN 978-1-4577-0547-2/12/ IEEE.\$31.00 ©2012.

LEITE, J.C. ABRIL, I. P., TOSTES, M. E. L., OLIVEIRA, R.C. L. **Optimización multiobjetivo de filtros pasivos**. Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution Latin America Conference and Exposition (TeD-LA), Montevideo, Uruguay, 3-5 Septiembre 2012.

LEITE, J. L. **Projeto multicritério de filtros harmônicos passivos para instalações industriais utilizando técnicas de inteligência computacional**. Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica. Tese de doutorado. Belém- Pará, 2013.

LEITE, J.L. ABRIL, I.P. AZEVEDO, M.S.S. TOSTES, M.E.L. BEZERRA, U.H. **Evolution of the passive harmonic filters optimization problem in industrial power systems**. Revista Dyna, Medellin, Colombia, 2014.

LEITE, J.C., SILVA, W. F., CASTRO, A. O., NOGUEIRA, R. M., AZEVEDO, M.S.S. **Planning Passive Filters using NSGA II for Industry Applications**. Industry Applications (INDUSCON), 2012 10th IEEE/IAS International Conference On. Juiz de Fora, MG. Brazil, 2014.

LEVITIN G., IEEE, A. KALYUZHNY, A. SHENKMAN, AND M. CHERTKOV. **Optimal Capacitor Allocation in Distribution Systems Using a Genetic Algorithm and a Fast Energy Loss Computation Technique**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, NO. 2, April 2000.

LIU M. B, CLAUDIO A. CAÑIZARES AND W. HUANG. **Reactive Power and Voltage Control in Distribution Systems With Limited Switching Operations**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, no. 2, may, 2009 .

KHODR H.M., F.G. OLSINA ,P.M. DE OLIVEIRA-DE JESUS J.M. YUSTA. **Maximum savings approach for location and sizing of capacitors in distribution systems**. Electric Power Systems Research 78 (2008) 1192–1203. ELSEVIER. Available online at www.sciencedirect.com.

KO, CHIA-NAN. CHANG, YING-PIN AND WU, CHIA-JU. **A PSO Method With Nonlinear Time-Varying Evolution for Optimal Design of Harmonic Filters**. IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 24, No. 1, February. Pp. 437. 2009.

KOROVESIS P.N., G.A. VOKAS, I.F. GONOS, AND F.V. TOPALIS. **Influence of large-scale installation of energy saving lamps on the line voltage distortion of a weak network supplied by photovoltaic station**. *IEEE on. Power Delivery.*, Vol. 19(4), pp. 1787-1793, Oct. 2004.

MAZA-ORTEGA, JOSÉ M. CHURIO-BARBOZA, JULIO C. BURGOS-PAYÁN, M. **A Software-based Tool for Optimal Design of Passive Tuned Filters**. ISBN 978-1-4244-6392-3/10/ ©2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronic, Bari/Italy. pp. 3273-3278. 2010.

MENDES A., P. M. FRANCA, C. LYRA, C. PISSARRA, AND C. CAVELLUCCI. **Capacitor placement in large-sized radial distribution networks**. Proc. IEE., Generation., Transmission and Distribution, vol. 152, no. 4, pp. 496–502, Jul. 2005.

MEKHAMER S. F., M. E. EL-HAWARY, S. A. SOLIMAN, M. A. MOUSTAFA, AND M. M. MANSOUR. **New Heuristic Strategies for Reactive Power Compensation of Radial Distribution Feeders**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 4, October 2002.

NASSIF, ALEXANDRE B. AND WILSON XU. **Passive Harmonic Filters for Medium-Voltage Industrial Systems: Practical Considerations and Topology Analysis**. IEEE 2007 39th North American Power Symposium (NAPS, 2007), pp. 301-307.

NASSIF, ALEXANDRE . B., XU, W. Y FREITAS, W. **An Investigation on the Selection of Filter Topologies for Passive Filter Applications**. IEEE Transactions on Power Delivery, 24(3), 2009.

NIMURA T., R. YOKOYAMA, B.J. CORY. **A fuzzy coordination approach for multi-objective voltage and reactive power scheduling of an electric power system.** Second IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 1, 267-272, 1993.

OLIVEIRA, L.C.O, G. A. E. MELO, J. SOUZA, A. CANESIN, B. D. BONATTO. **Harmonic Propagation Analysis in Electric Energy Distribution Systems.** (2011).

PARK, J. Y.; SOHN, J. M.; PARK, J. K. **Optimal capacitor allocation in a distribution system considering operation costs.** IEEE Transactions Power Systems, New York, v. 24, n. 1, p. 462-468, 2009.

PEREIRA, H. C. D. **Uma Abordagem Evolutiva Multi-Objectivo para o Problema de Compensação de Energia Reactiva em Redes de Distribuição de Energia Eléctrica.** Tese submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Especialidade Sistemas de Energia. Faculdade de Ciências e Tecnologia .Universidade de Coimbra, 2011.

PETRELT, A.M. **Automatic allocation of network capacitors.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-90(1), 54-61, Janeiro, 1971.

PROCEL, 2011: **Selo Procel de Economia de Energia** “ Programa Nacional de Conservação de Energia Eléctrica” , MAIO/2011.

PRODIST/ANNEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Eléctrica no Sistema Eléctrico Nacional.** ANEEL. Brasília. Módulo 8. 2008.

RICHARD, M.K.; SEN, P.K. **Compact Fluorescent Lamps and Their Effect on Power Quality and Application Guidelines** . Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2010 IEEE Topic(s): Components, Circuits, Devices e Systems ; Power, Energy, e Industry Applications Digital Object Identifier:10.1109/IAS.2010.5615449 Publication Year: 2010 , Page(s): 1 – 7.

RASHTCHI GHIASI, M., V. HOSEINI, H. **Optimum location and sizing of passive filters in distribution networks using genetic algorithm.** Engineering student and faculties of Zanjan University, Iran. International Conference on IEEE 2008.

RACHID, SEFIANE, SLIMANE. **Power quality and cost improvement by passive power filters synthesis using ant colony algorithm.** Journal of Theoretical and Applied Information Technology © 2005 - 2011 .

RAVIKUMAR V.. ZEINELDIN, H.H. AND WEIDONG XIAO. **Passive Harmonic Filter Planning to Overcome Power Quality Issues in Radial Distribution Systems.** Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE. 22-26 July. ISBN 978-1-4673-2729-9/12

RÖNNBERG, S.K.; BOLLEN, M.H.J.; WAHLBERG, M. **Harmonic emission before and after changing to LED and CFL — Part I: Laboratory measurements for a domestic customer.** Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010 14th International Conference on Topic(s): Power, Energy, e Industry Applications Digital Object Identifier:10.1109/ICHQP.2010.5625411 Publication Year: 2010 , Page(s): 1 - 7 .

SANJEEV, S. AND SINGH, BHIM. **Passive Filter Design for a 12-Pulse Converter fed LCI-Synchronous Motor Drive.** Fellow, IEEE, 2011.

SCHMILL, J.V., 1965. **Optimum Size and Location of Shunt Capacitors on Distribution Feeders**. IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. 84, no.9, pp. 825-832.

SHARAF, ADEL M. EL-GAMMALL. **A Discrete Particle Swarm Optimization Technique (DPSO) For Power Filter Design**. ISBN978-1-4244-5 50-2. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, Year 2009.

SHENGQING, LI, YONGAN K., XIAODONG LUO, LILIN ZENG, ZHENGPING HE. **Multi-objective Optimal Design for Passive Power Filters in Hybrid Power Filter System Based on Multi-island Particle Swarm Optimization**. IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia June 2-5. Harbin, China. 2012.

SEGURA SILVIO, RUBÉN ROMERO, MARCOS J. RIDER. **Efficient heuristic algorithm used for optimal capacitor placement in distribution systems**. Electrical Power and Energy Systems Vol 32 pp. 71–78 Year 2010.

SESHADRI, A. **NSGA-II source code**, Available <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10429-nsga-ii-a-multi-objective-optimization-algorithm/content/NSGA-II/>, [citado 23 de Outubro de 2012].

SEYED ABBAS TAHER , ALI KARIMIAN, MOHAMMAD HASANI. **A new method for optimal location and sizing of capacitors in distorted distribution networks using pso algorithm simulation modelling practice and theory**. 19 (2011) 662–672. elsevier b.v. ,2010, journal homepage: www.elsevier.com/locate/simpat.

SINGH, S. P. and RAO, A. R. **Optimal allocation of capacitors in distribution systems using particle swarm optimization**. Electrical Power and Energy Systems 43 (2012) 1267–1275.elsevier, journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijepes.

STAGG, EL-ABIAD. “Computer Methods in Power Systems Analysis”. (1968).

TABATABAEI S.M., B. VAHIDI. **Bacterial foraging solution based fuzzy logic decision for optimal capacitor allocation in radial distribution system**. Electric Power Systems Research, Volume 81, Issue 4, April 2011, Pages 1045-1050.

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, Vol. 11, No. 1, January 1996.

TOMISLAV B. SEKARA, JOVAN C, MIKULOVIC', AND Z' ELJKO R. DJURIS'IC. **Optimal Reactive Compensators in Power Systems Under Asymmetrical and Nonsinusoidal Conditions**. IEEE Transactions on Power Delivery, VOL. 23, NO. 2, April 2008.

TOSTES M.E.L., BEZERRA, U. H., SILVA, R. D. S.,VALENTE,J.A.L. C. C. M. DE MOURA AND T. M. M. BRANCO. **Impacts Over the Distribution Grid From the Adoption of Distributed Harmonic Filters on Low-Voltage Customers**. IEEE Trans. Power Del., vol.20, pp. 384-389, January 2005.

VERMA, VISHAL AND SINGH, BHIM. **Genetic-Algorithm-Based Design of Passive Filters for Offshore Applications**. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 46. No. 4, July/August. p.1295. 2010.

VENKATESH, V. 1999. **Creating favorable user perceptions: Exploring the role of intrinsic motivation**. MIS Quart. 23(2) 239–260.

WATSON, NEVILLE R., TASMAN L. SCOTT, AND STEPHEN J. J. Hirsch. **Implications for Distribution Networks of High Penetration of Compact Fluorescent Lamps**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 3, July, 2009.

WU, C. W., B.M. ZHANG, K.L. LO. **Capacitors dispatch for quasi minimum energy loss in distribution systems using a loop-analysis based method**. Electrical Power and Energy Systems . Vol 32 pp. 543–550 Year 2004.

ZHANG RUIHUA, LIU YUHONG, LI YAOHUA. **Optimal Parameters for Filter Using Improved Genetic Algorithms. Sustainable Power Generation and Supply**. 2009. SUPERGEN '09. International Conference on IEEE. pp. 6-7. April. 2009.

ZIARI, IMAN, LEDWICH, GERARD F., e GHOSH, ARINDAM (2013). **A new technique for optimal allocation and sizing of capacitors and setting of LTC**. *International Journal of Electrical Power e Energy Systems*, 46(March), pp. 250-257.

ZOBAA, A. F. **Cost-Effective Applications of Power Factor Correction for Nonlinear Loads**. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 20, No. 1. January 2005 p.359. 2005.

ZOBAA, A.F. **Maintaining a Good Power Factor and Saving Money for Industrial Loads**. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, Vol. 53, No. 2, April 2006.

APÊNDICE A

DADOS DO CIRCUITO DE TESTE

Como sistema teste utilizou-se o alimentador de distribuição **Aparecida #3** da cidade de Manaus-AM, pertencente à concessionária Amazonas Energia, cujo diagrama unifilar encontra-se representado na figura A.1.

Este alimentador de 13,8 kV atende 56 transformadores que totalizam uma potência de 14,37 MVA, em cada um dos quais há uma mescla de carga linear e não-linear.

O referido alimentador é suprido pelo transformador da subestação no nó 0, onde se considerou uma potência de curto circuito de 250 MVA com relação $X/R = 10$.

Os dados do alimentador e suas cargas são mostrados na tabela A.1, onde cada seção do circuito se define mediante as barras inicial e final, o condutor empregado e seu comprimento em metros, enquanto que os dados do transformador são as potências em kW e kVAr que correspondem às cargas conectada nos secundários.

A carga não-linear representa um percentual da carga linear em cada barra e se supõe balanceada entre as três fases. A mesma se compõe de equipamentos eletrodomésticos com um espectro harmônico característico que se mostra na tabela A.2.

Para avaliar o comportamento do sistema vão se considerar três estados de carga possíveis em um ano característico, como mostrado na tabela A.3.

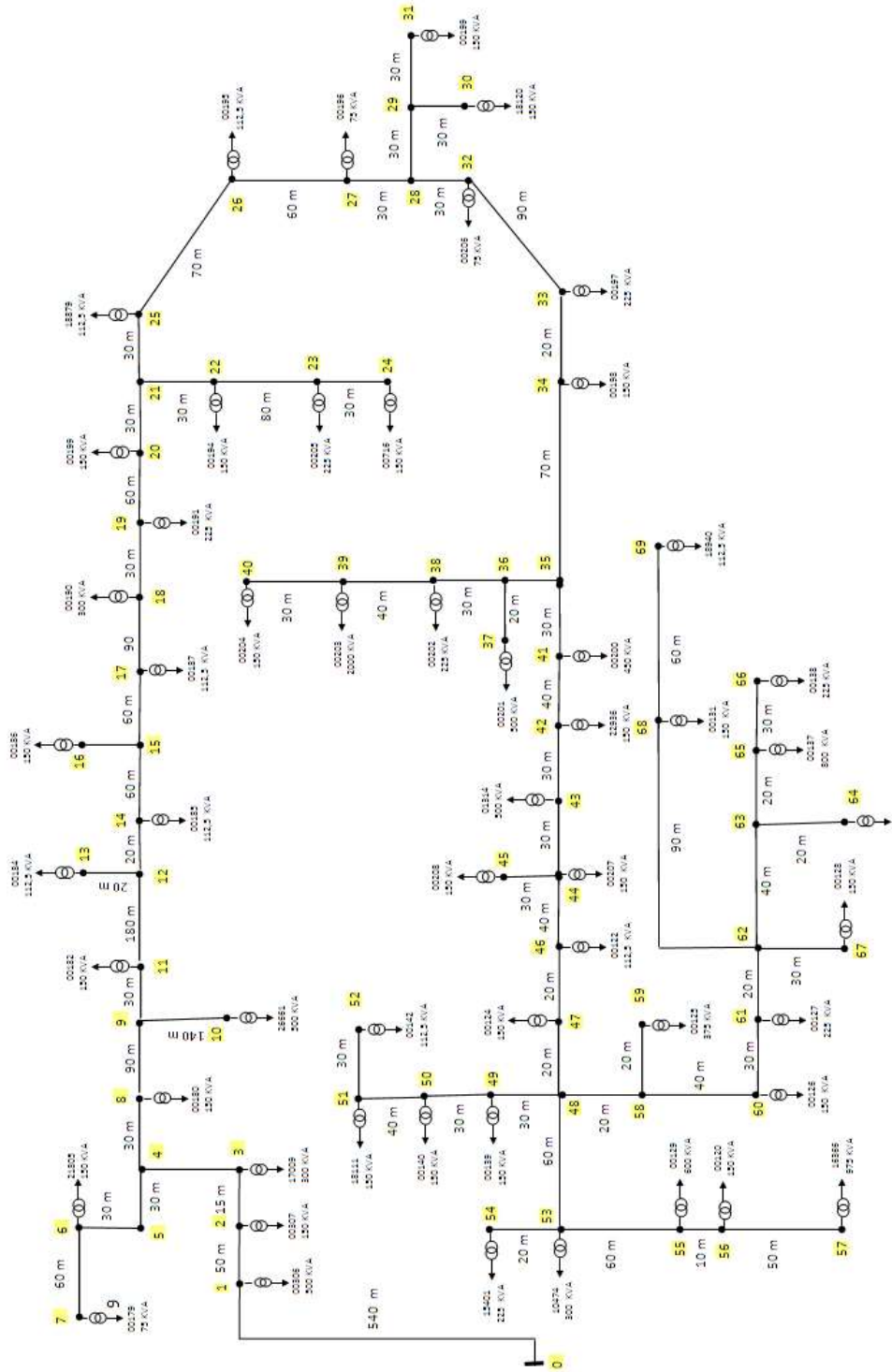


Fig. A. 1 - Diagrama do alimentador de distribuição "Aparecida 3", da Amazonas Energia.

Tabela A. 1 - Dados do alimentador de distribuição

Seção de circuito				Carregamento		
Nós inicial	Nós final	Condutor (mm ²)	Comprimento (m)	Transformador (kVA)	Carga Ativa (kW)	Carga Reativa (kVAr)
0	1	170	540	500,0	270,0	130,8
1	2	170	50	150,0	108,0	52,3
2	3	170	15	300,0	216,0	104,6
3	4	170	180	0,0	0,0	0,0
4	5	170	30	0,0	0,0	0,0
5	6	170	30	150,0	108,0	52,3
5	7	170	60	75,0	54,0	26,2
4	8	170	30	150,0	108,0	52,3
8	9	170	90	0,0	0,0	0,0
9	10	170	70	500,0	270,0	130,8
9	11	170	30	150,0	108,0	52,3
11	12	170	180	0,0	0,0	0,0
12	13	170	20	112,5	81,0	39,2
12	14	170	40	112,5	81,0	39,2
14	15	170	60	0,0	0,0	0,0
15	16	170	30	150,0	108,0	52,3
15	17	170	60	112,5	81,0	39,2
17	18	170	90	300,0	216,0	104,6
18	19	170	30	225,0	162,0	78,5
19	20	170	60	150,0	108,0	52,3
20	21	170	30	75,0	54,0	26,2
21	22	170	30	150,0	108,0	52,3
22	23	170	80	225,0	162,0	78,5
23	24	170	30	150,0	108,0	52,3
21	25	170	30	112,5	81,0	39,2
25	26	170	70	112,5	81,0	39,2
26	27	170	60	75,0	54,0	26,2

27	28	170	30	0,0	0,0	0,0
28	29	170	30	0,0	0,0	0,0
29	30	170	30	150,0	108,0	52,3
29	31	170	30	150,0	108,0	52,3
28	32	170	30	75,0	54,0	26,2
32	33	170	90	225,0	162,0	78,5
33	34	170	20	150,0	108,0	52,3
34	35	170	70	0,0	0,0	0,0
35	36	170	30	0,0	0,0	0,0
36	37	170	20	500,0	270,0	130,8
36	38	170	30	225,0	162,0	78,5
38	39	170	40	2000,0	1080,0	523,1
39	40	170	30	150,0	108,0	52,3
35	41	170	40	450,0	243,0	117,7
41	42	170	40	150,0	108,0	52,3
42	43	170	50	500,0	270,0	130,8
43	44	170	30	150,0	108,0	52,3
44	45	170	30	150,0	108,0	52,3
44	46	170	40	112,5	81,0	39,2
46	47	170	20	150,0	108,0	52,3
47	48	170	20	0,0	0,0	0,0
48	49	170	30	150,0	108,0	52,3
49	50	170	30	150,0	108,0	52,3
50	51	170	50	150,0	108,0	52,3
51	52	170	30	112,5	81,0	39,2
48	53	170	60	300,0	216,0	104,6
53	54	170	20	225,0	162,0	78,5
53	55	170	60	600,0	324,0	156,9
55	56	170	10	150,0	108,0	52,3
56	57	170	50	975,0	526,5	255,0
48	58	170	20	0,0	0,0	0,0
58	59	170	20	375,0	202,5	98,1
58	60	170	40	150,0	108,0	52,3

60	61	170	30	225,0	162,0	78,5
61	62	170	20	0,0	0,0	0,0
62	63	170	40	0,0	0,0	0,0
63	64	170	20	45,0	32,4	15,7
63	65	170	20	800,0	432,0	209,2
65	66	170	30	225,0	162,0	78,5
62	67	170	30	150,0	108,0	52,3
62	68	170	90	150,0	108,0	52,3
68	69	170	60	112,5	81,0	39,2

Tabela A. 2 - Espectro harmônico característico das cargas não-lineares

Ordem	Correntes (%)			Ângulo (graus)		
	A	B	C	A	B	C
1	100.0	100.0	100.0	-37.0	-157.0	83.0
5	37.3	37.3	37.3	-166.0	-46.0	74.0
7	12.7	12.7	12.7	113.0	-7.0	233.0
11	5.3	5.3	5.3	-158.0	-38.0	82.0
13	2.5	2.5	2.5	92.0	-28.0	212.0
17	1.8	1.8	1.8	-151.0	-31.0	89.0
19	1.1	1.1	1.1	84.0	-36.0	204.0

Tabela A. 3 - Estados de carga

Parâmetro	Estados		
	1	2	3
Duração (horas/ano)	730	5840	2190
Carga (%)	100	60	30