



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

**PROJETO MULTICRITÉRIO DE FILTROS HARMÔNICOS PASSIVOS PARA
INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS UTILIZANDO TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA
COMPUTACIONAL**

TESE DE DOUTORADO

JANDECY CABRAL LEITE

**BELÉM, PARÁ
2013**

**PROJETO MULTICRITÉRIO DE FILTROS HARMÔNICOS PASSIVOS PARA
INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS UTILIZANDO TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA
COMPUTACIONAL**

JANDECY CABRAL LEITE

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^a. Dra. MARIA EMÍLIA DE LIMA TOSTES – UFPA
Orientadora

PROF^o Dr. UBIRATAN HOLANDA BEZERRA - UFPA
Co-orientador

BELÉM, PARÁ
2013

Leite. Jandecy Cabral.

Projeto multicritério de filtros harmônicos passivos para instalações industriais utilizando técnicas de inteligência computacional. / Jandecy Cabral Leite; orientadora Maria Emília de Lima Tostes. TD 92. 2013.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2013.

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

CDD 22. ed. 621.3191

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

**“PROJETO MULTICRITÉRIO DE FILTROS HARMÔNICOS PASSIVOS PARA INSTALAÇÕES
INDUSTRIAIS UTILIZANDO TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL”**

AUTOR: **JANDECY CABRAL LEITE**

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: **29 / 05 / 2013**

BANCA EXAMINADORA:



Prof.^a Dr.^a Maria Emília de Lima Tostes

(Orientadora – PPGEE/UFPA)



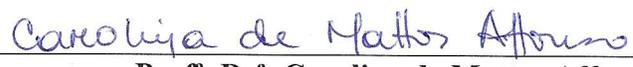
Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra

(Co-Orientador – PPGEE/UFPA)



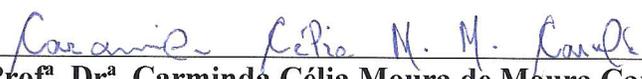
Prof. Dr. Roberto Célio Limão de Oliveira

(Membro – PPGEE/UFPA)



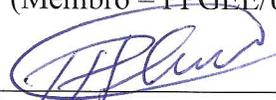
Prof.^a Dr.^a Carolina de Mattos Affonso

(Membro – PPGEE/UFPA)



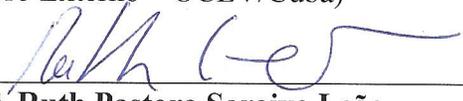
Prof.^a Dr.^a Carminda Célia Moura de Moura Carvalho

(Membro – PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Ignácio Perez Abril

(Membro Externo – UCLV/Cuba)



Prof.^a Dr.^a Ruth Pastora Saraiva Leão

(Membro Externo – UFC)

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.

Ais meus queridos irmãos Jacira, Jupaty, Jonaci, Jandino, Jucilande e Eliana pelo amor e espírito de união.

Aos Professores, Prof^a. Dra. Maria Emília de Lima Tostes, Prof^o Dr. Roberto Célio Limão de Oliveira e Prof^o Dr. Ubiratan Holanda Bezerra pela orientação, competência e dedicação à realização desta tese.

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^o 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.

Aos coordenadores do Uninorte que permitiram várias vezes minhas viagens a Belém para resolver as questões deste curso.

Aos professores da Universidade Central “Martha Abreu” de Las Villas (UCLV), doutores Francisco Beraldo Herrera Fernandez, Carlos Alberto De Leon Benitez, Ignacio Perez Abril pelo incentivo e apoio.

Aos Professores doutores da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) que me fizeram acreditar sobre as propostas para engrandecer os projetos na Amazônia: Edson Pacheco Paladini, Robert Wayne Samohyl, Carlos Manoel Taboada Rodriguez, Paulo Augusto Cauchick Miguel e Lucila Maria de Souza Campos.

Aos meus colegas do Uninorte, Nadime, Alberto e Carlos Américo.

Aos colegas do curso de doutorado, em especial ao Prof^o M.Sc. Manoel Socorro Santos Azevedo.

Aos amigos, Jorge de Almeida Brito Junior, Weverson dos Santos Cirino, Benevaldo Pereira Gonçalves, Elcimar Souza Correa, Orlewilson Alysson Silva, Francisca Cruz, Paula Raquel, Raimundo Valdan, Vagner Barroso Pinto, Paulo Cesar Rocha Gomes, Wagner Ferreira Silva, Raimundo Furukawa, Orlem Pinheiro e Sandro Santiago Breval.

A todos os alunos da UNINORTE.

A todos os Stakaholders trabalhados.

Epígrafe

“A nova vida nasce, quando o homem encontra DEUS dentro do seu eu”
Jandecy

Dedicatória

Aos meus filhos Aline, Jandecy Junior e Vitor Anderson
A minha esposa Tereza Felipe em especial

SUMÁRIO

	LISTA DE FIGURAS	10
	LISTA DE TABELAS	12
	LISTA DE SIGLAS	13
	RESUMO	14
	ABSTRACT	15
	CAPÍTULO 1	16
	<i>Introdução</i>	16
1.1	Motivação	16
1.2	Tese em Etapas	17
1.3	Objetivos	18
1.3.1	Objetivo Geral	18
1.3.2	Objetivos específicos	18
1.4	Contribuição e Relevância do Estudo	18
1.5	Estado da Arte – Pesquisas Correlatas	20
1.5.1	Introdução	20
1.5.2	Otimização de filtros de harmônicos	24
1.5.3	Formulações mono objetivo	24
1.5.4	Formulações multiobjetivo	29
1.6	Estrutura da Tese	34
	CAPÍTULO 2	35
	Normas de Qualidade de Energia	35
2.1	Introdução	35
2.2	Norma IEC 61000 de Compatibilidade Eletromagnética (EMC)	35
2.2.1	Metodologia de aplicação	37
2.3	Norma IEEE Std. 519 – 92	39
2.3.1	Aplicação da Norma	41
2.4	ANEEL - PRODIST - Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica	43
2.4.1	Aplicação do PRODIST	45
2.6	Considerações	46
	CAPÍTULO 3	48
	Filtros Passivos de Harmônicos	48
3.1	Introdução	48
3.2	Filtros sintonizados	49
3.2.1	Variação dos parâmetros	51
3.3	Filtros amortecidos (passa-alta)	53
3.3.1	Filtro de segunda ordem	54
3.3.2	Filtro de terceira ordem	56
3.3.3	Filtro tipo C	58

3.4	Saturação dos componentes	59
3.5	Custos dos filtros	60
	CAPÍTULO 4	62
	Análises de Harmônicos	62
4.1	Introdução	62
4.2	Fontes de harmônicos	63
4.3	Modelo matemáticos dos elementos do sistema	65
4.3.1	Transformadores	66
4.3.2	Alimentadores	70
4.3.3	Máquinas rotativas	72
4.3.4	Cargas passivas	73
4.3.5	Outros elementos	75
4.4	Varredura de frequência	75
4.5	Fluxo de harmônico	77
4.6	Implementação	79
4.6.1	Função Loadflow	79
4.6.2	Função Harmflow	80
4.6.3	Programa Freqscan	81
	CAPÍTULO 5	82
	Otimização Multiobjetivo para o Projeto de Filtros Passivos	82
5.1	Introdução	82
5.2	Formulação do problema	83
5.2.1	Variáveis do problema (cromossoma)	83
5.2.2	Funções objetivo	88
5.2.2.1	VPL do projeto dos filtros	89
5.2.2.2	Objetivos de controle de harmônicos	91
5.2.3	Restrições	92
5.3	Algoritmo de otimização	95
5.3.1	Avaliação da função objetivo	100
5.3.2	Algoritmo principal	102
5.4	Análises da robustez das soluções	104
5.5	Exemplo de aplicação	105
5.5.1	Projeto dos filtros para os três cenários característicos	107
5.5.2	Projeto dos filtros para os cinco cenários possíveis	111
5.6	Conclusões	115
	CAPÍTULO 6	116
6.1	Conclusões	116
6.2	Algumas sugestões para futuros trabalhos	117
	REFERÊNCIAS	118
	APÊNDICES	127
	ARTIGOS PUBLICADOS	133

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Efeito do filtro	20
Figura 1.2	Filtro sintonizado	21
Figura 1.3	Filtros amortecidos: 1ª ordem, 2ª ordem, 3ª ordem e tipo C	21
Figura 1.4	Conjunto de filtros passivos	22
Figura 1.5	Ressonância paralela	23
Figura 2.1	Ponto de conexão comum (PCC)	39
Figura 3.1	Filtro passivo paralelo	49
Figura 3.2	Filtro sintonizado. a) Topologia, b) Impedância versus frequência	49
Figura 3.3	Largura de faixa	50
Figura 3.4	Efeito de variação dos parâmetros: (a) capacitância, (b) indutância	52
Figura 3.5	Filtros amortecidos. (a) 1ª ordem, (b) 2ª ordem, (c) 3ª ordem, (d) tipo C	53
Figura 3.6	Filtro de segunda ordem: a) Topologia, b) Impedância versus frequência	54
Figura 3.7	Efeito de variação dos parâmetros: (a) capacitância, (b) indutância	56
Figura 3.8	Filtro de terceira ordem. a) Topologia, b) Impedância x frequência	56
Figura 3.9	Efeito de variação dos parâmetros: (a) capacitância, (b) indutância	58
Figura 3.10	Filtro tipo C. a) Topologia, b) Impedância x frequência	59
Figura 3.11	Efeito de variação dos parâmetros: (a) capacitância, (b) indutância	58
Figura 3.12	Custo de capacitores	61
Figura 3.13	Custo de reatores	61
Figura 4.1	Tensões fase-fase segundo a modelagem em coordenadas de fase para esquemas delta ou estrela a quatro fios	65
Figura 4.2	Banco Yg-D de transformadores monofásicos	66
Figura 4.3	Sub-redes que compõem o banco de transformadores	67
Figura 4.4	Transformador de quatro terminais	67
Figura 4.5	Transformador de cinco terminais	68
Figura 4.6	Circuito π da linha	70
Figura 4.7	Circuito da máquina síncrona	72
Figura 4.8	Circuito do motor de indução	72
Figura 4.9	Modelo paralelo	73
Figura 4.10	Modelo série	74
Figura 4.11	Varredura de frequência em uma barra de um sistema delta de quatro fios	75
Figura 4.12	Propagação de harmônicos pela rede	78
Figura 5.1	Configuração tipo 1	85
Figura 5.2	Configuração tipo 2	85
Figura 5.3	Configuração tipo 3	86
Figura 5.4	Configuração tipo 4	86
Figura 5.5	Obtenção da População P_{t+1}	98
Figura 5.6	Algoritmo de Evaluate_Objectives	101
Figura 5.7	Algoritmo principal	103

Figura 5.8	Exemplo do sistema	105
Figura 5.9	Espaço das soluções viáveis (caso 1)	107
Figura 5.10	Soluções ordenadas possíveis (caso 1)	108
Figura 5.11	Resultados com desvalorização dos filtros (caso 1)	109
Figura 5.12	Distorção da corrente no PCC (caso 1)	110
Figura 5.13	Distorção da tensão na barra N10 (caso 1)	110
Figura 5.14	Varredura de frequência na barra N10	111
Figura 5.15	Soluções ordenadas (caso 2)	112
Figura 5.16	Resultados com desvalorização dos filtros (caso 2)	113
Figura 5.17	Varredura de frequência na barra N10	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Níveis de compatibilidade para as tensões harmônicas individuais em redes de baixa (BT) e média tensão (MT).	36
Tabela 2.2	Níveis de planejamento para tensões harmônicas individuais em redes de média (MT), alta (AT) e extra-alta tensão (EAT).	37
Tabela 2.3	Limites de distorção de tensão	39
Tabela 2.4	Limites de distorção da corrente no PCC	40
Tabela 2.5	Terminologia	44
Tabela 2.6	Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)	44
Tabela 2.7	Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental)	45
Tabela 4.1	Impedância da metade do enrolamento	69
Tabela 5.1	Variáveis que descrevem um filtro	84
Tabela 5.2	Cenários para as análises	106
Tabela 5.3	Resultados iniciais (caso 1)	107
Tabela 5.4	Parâmetros dos filtros selecionados (caso 1)	108
Tabela 5.5	Resultados finais (caso 1)	109
Tabela 5.6	Resultados iniciais (caso 2)	111
Tabela 5.7	Parâmetros dos filtros selecionados (caso 2)	112
Tabela 5.8	Resultados finais (caso 2)	113
Tabela 5.9	Comparação entre soluções 1 e 2 para caso 2.	114

LISTA DE SIGLAS

PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PETROBRÁS	Petróleo Brasileiro S.A
PIM	Pólo Industrial de Manaus
MATLAB	Matrix Laboratory
SQP	<i>Sequential Quadratic Programming</i>
SA	<i>Simulated Annealing</i>
DE	<i>Differential Evolution</i>
ANN	<i>Artificial Neural Networks</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
AG	Algoritmo Genético
PCC	Ponto de Conexão Comum
ASPS	<i>Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation</i>
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
THD	Total Harmonic Distortion
THDI	Current Total Harmonic Distortion
THDV	Total Harmonic Distortion Voltage
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
n_{new}	Frequência de Ressonância
n_{nom}	Frequência de sintonia nominal do filtro
Z	Impedância
R	Resistor
rms	<i>Root Mean Square</i>
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
Fd_1, \dots, Fd_{w+1}	Fatores de distribuição da potência reativa entre todos os ramos
Fq_1, \dots, Fq_{w+3}	Frequências de sintonia de todos os ramos
Q_1, \dots, Q_{w+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

SSG	Golden Section Search
PSO-NTVE	Particle Swarm Optimization with Nolinear Time – Varying Evolution
DPSO	Discrete Particle Swarm Optimization
SGA	Algorithm Genetic Simples
IDD	Distorção Demanda Individual
DITh	Distorção harmônica de tensão de ordem h
DIT	Distorção harmônica total de tensão
IHD	Distorção Harmônica Individual
Qcnom	Potência reativa
<i>n</i>	Frequência de sintonia
BP	Banda de passo
ΔC	Variações de Capacitância
ΔL	Variações de Indutância
WBGA	Weight-based Genetic Algorithm
SBX	Simulated Binary Crossover

RESUMO

Devido ao auge do crescimento industrial na Região Norte e, em especial, o Pólo Industrial de Manaus (PIM), são necessários obter ferramentas matemáticas que facilitem ao especialista tomar decisões sobre a seleção e dimensionamento dos filtros harmônicos que proporcionam neutralizar os efeitos prejudiciais dos harmônicos gerados pelas cargas não lineares da indústria e alcançar conformidade com os padrões das normas de qualidade de energia correspondentes. Além disso, como os filtros harmônicos passivos têm a capacidade de gerar potência reativa à rede, estes meios são eficazes compensadores de potência reativa e, portanto, podem conseguir uma economia significativa no faturamento de energia elétrica consumida por essas instalações industriais. Esta tese tem como objetivo geral desenvolver um método matemático e uma ferramenta computacional para a seleção da configuração e parâmetros do projeto de um conjunto de filtros harmônicos passivos para sistemas elétricos industriais. Nesta ótica, o problema de otimização da compensação de harmônicos por meio de filtros passivos foi formulado como um problema multiobjetivo que considera tanto os objetivos da redução da distorção harmônica como da efetividade econômica do projeto considerando as características das tarifas brasileiras. Todavia, a formulação apresentada considera as restrições relevantes impostas pelas normas brasileiras e estrangeiras. A solução computacional para este problema foi conseguida, usando o algoritmo genético NSGA-II que determina um conjunto de soluções ótimas de Pareto (Fronteira) que permitem ao projetista escolher as soluções mais adequadas para o problema. Por conseguinte, a ferramenta computacional desenvolvida tem várias novidades como: não só calcula os parâmetros que caracterizam os filtros, como também seleciona o tipo de configuração e o número de ramos do filtro em cada barra candidata de acordo com um conjunto de configurações pré-estabelecidas; têm implementada duas normas para a avaliação das restrições de qualidade de energia (Prodinst-Módulo 8 e IEEE 519-92) que podem ser selecionadas pelo usuário; determina soluções com bons indicadores de desempenho para vários cenários característicos e não característicos do sistema que permitem a representação das variações diárias da carga; das variações dos parâmetros do sistema e dos filtros; avalia o custo das contas de energia numa rede elétrica industrial que tem diferentes condições de operação (cenários característicos); e avalia o efeito econômico de filtros de harmônicos como compensadores de potência reativa. Para desenvolver a ferramenta computacional adequada desta tese, foi empregado um modelo trifásico em coordenadas de fase para redes de energia elétrica industriais e de serviços onde foram feitos vários programas utilizando várias ferramentas computacionais adicionais. Estas ferramentas compreendem um programa de varredura de frequência, um programa do fluxo de harmônicos por injeção de correntes e um programa de fluxo de potência à frequência fundamental. Os resultados positivos desta tese, a partir da análise de vários exemplos práticos, mostram as vantagens do método desenvolvido.

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

ABSTRACT

Due to the importance of the industrial growth in the North and in particular the Industrial Pole of Manaus (PIM), it is important to have mathematical tools that facilitate the expert decisions on the selection and sizing of harmonic filters needed to neutralize the harmful effects of harmonics generated by nonlinear loads of industry and achieve compliance with the power quality standards. Moreover, as the passive harmonic filters have the capacity to generate reactive power to the network, they are effective compensating reactive power means and therefore can achieve significant savings in sales of electric energy consumed by these industrial facilities. This thesis aims to develop a mathematical method and a computational tool for the selection of the configuration and the design parameters of a set of passive harmonic filters for industrial electrical systems. In this direction, the optimization problem of compensation of harmonics through passive filters is formulated as a multi-objective problem that considers both the goals of reducing harmonic distortion as the economic effectiveness of the project considering the characteristics of the Brazilian system of tariffs. Moreover, the presented formulation considers relevant restrictions imposed by the national and foreign standards. A computational solution to this problem was achieved using the NSGA-II genetic algorithm which determines a set of Pareto optimal solutions (Frontier) that enable the designer to choose the most appropriate solutions to the problem. Furthermore, the computational tool developed has several new features as: not only calculates the parameters that characterize the filters, but also selects the type of configuration and the number of branches of the filter in each candidate bus according to a set of predetermined settings; has implemented two standards for assessing the constraints of power quality (Prodist Modulo-8 and IEEE 519-92) that can be selected by the user; determines solutions with good performance indicators for various characteristic and non-characteristic scenarios of the system that allow to represent: the daily variations of the load as well as the variations of system parameters and filters; evaluates the cost of energy bills in a grid that has different industrial operating conditions (characteristic scenarios) and assesses the economic effect of harmonic filters as reactive power compensators. To develop the computational tool of this thesis, it was used a phase-coordinates model for the electric power grids of industrial and services installations to program additional computational tools. These tools comprise a frequency scan program, a harmonic power flow program for the harmonic current injection method and a fundamental frequency power flow program. The positive results of this thesis, from the analysis of several practical examples show the advantages of the developed method.

Keywords: Genetic Algorithms, Harmonics, Power Quality, Electrical Distribution.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Os sistemas elétricos modernos contém uma grande quantidade de fontes contaminantes ou produtores de harmônicos onde se destacam fundamentalmente as cargas não lineares empregadas nas indústrias, nas instalações comerciais e residenciais (TOSTES, 2003).

As fontes contaminantes de média e alta potência geralmente se concentram nos sistemas elétricos industriais. Entre estas se incluem conversores estáticos de potência e fornos de arco elétrico.

Em instalações comerciais e residenciais, são empregadas uma grande quantidade de cargas não lineares de pequena potência, que devido a seu grande número não podem ser desprezadas, como fonte de distorção. Este é o caso de equipamentos eletrodomésticos e de escritório, lâmpadas de descarga, entre outros.

Os harmônicos injetados no sistema elétrico pelas cargas não lineares produzem efeitos: nos próprios sistemas elétricos de potência e nas cargas elétricas conectadas a estes, assim como nos sistemas de comunicações.

Todos os efeitos dos harmônicos em sistemas de potência são prejudiciais e entre eles pode-se citar:

- 1) A possível existência de ressonâncias série e paralelo, que contribuem para a amplificação dos harmônicos e seus efeitos;
- 2) Redução da eficiência do sistema, aumentando as perdas nos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia;
- 3) O envelhecimento prematuro do isolamento dos componentes da rede elétrica e, conseqüentemente, redução da sua vida útil.
- 4) O mau funcionamento do sistema ou quaisquer de seus componentes.

Um dos fenômenos mais prejudiciais associados com a presença dos harmônicos é a possibilidade de ocorrência de ressonância no circuito elétrico. Como a maioria dos elementos existentes nos sistemas de potência como: transformadores, máquinas rotativas, etc. têm caráter indutivo, a presença de bancos de capacitores para compensar o fator de potência ou o próprio efeito capacitivo das linhas de potência pode interagir com os elementos indutivos do circuito de forma que a determinadas frequências são iguais às reatâncias indutivas e capacitivas equivalentes causando uma condição de ressonância em que podem aparecer altos valores de tensão e de corrente, que afetam o funcionamento correto do sistema e podem causar falhas nos equipamentos.

Os filtros harmônicos são dispositivos ativos ou passivos, cuja missão é de evitar a circulação dos harmônicos pelo sistema elétrico de potência para impedir a ocorrência de ressonâncias prejudiciais e evitar outros efeitos indesejáveis que podem ocorrer.

Apesar dos filtros ativos terem características de desempenho melhores que os passivos, estes últimos ainda são mais usados que os primeiros.

Devido ao auge do crescimento industrial na Região Norte e, em especial, o Pólo Industrial de Manaus (PIM), é preciso ter ferramentas matemáticas que facilitem ao especialista tomar decisões sobre a seleção e dimensionamento dos filtros harmônicos necessários para neutralizar os efeitos prejudiciais dos harmônicos gerados pelas cargas não lineares da indústria e alcançar conformidade com os padrões das normas de qualidade da energia correspondentes.

Além disso, como os filtros harmônicos passivos têm a capacidade de filtragem e também de gerar potência reativa à rede, estes meios são eficazes compensadores de potência reativa e, portanto, podem conseguir uma economia significativa no faturamento de energia elétrica consumida por essas instalações industriais.

Esta tese tem como objetivo desenvolver uma ferramenta apropriada para o propósito anteriormente apresentado. A ferramenta caracteriza-se por incorporação de várias possibilidades inovadoras nesta área.

1.2 A Tese em Etapas

Reconhecendo a relevância do assunto abordado, a presente tese é desenvolvida em duas etapas. A primeira etapa apresenta os seguintes tópicos: Uma caracterização das principais fontes

de geração de harmônicos em instalações industriais; Desenvolvimento dos modelos e ferramentas computacionais para as análises de harmônicos em instalações industriais; Elaboração de um algoritmo evolutivo e ferramenta computacional para determinar soluções ótimas do ponto de vista técnico e econômico do projeto de filtros passivos de harmônicos em sistemas industriais.

A segunda etapa consiste na validação das ferramentas computacionais desenvolvidas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um método matemático e uma ferramenta computacional para a seleção da configuração e parâmetros de projeto de um conjunto de filtros harmônicos passivos para sistemas elétricos industriais.

1.3.2 Objetivos Específicos

- 1) Identificar as características dos filtros harmônicos passivos em sistemas elétricos industriais;
- 2) Desenvolver os modelos e ferramentas computacionais para avaliar o impacto dos filtros harmônicos passivos em redes elétricas industriais com cargas não lineares;
- 3) Formular o problema de otimização multiobjetivo utilizando uma ferramenta computacional para a seleção da configuração e parâmetros de projeto de um conjunto de filtros harmônicos passivos em sistemas elétricos industriais;
- 4) Propor ações para aplicação das ferramentas desenvolvidas à solução de casos práticos.

1.4 Contribuição e Relevância do Estudo

A presente tese justifica-se pela necessidade de superar algumas limitações dos métodos desenvolvidos nas bibliografias referenciadas entre as quais pode-se citar:

- 1) Mostram-se uma variedade de abordagens sobre os objetivos a atingir com a instalação de filtros nos sistemas elétricos industriais, mas não formulam explicitamente o objetivo de maximizar os benefícios econômicos produzidos por esses filtros;

2) Concentram-se na determinação dos parâmetros de projeto de determinados tipos de filtro, cuja configuração é selecionada previamente à otimização, e nunca consideram a otimização da própria seleção do tipo de filtro a ser utilizado;

3) Em muitos casos, a otimização é realizada para uma determinada condição de carga, o que se opõe ao caráter essencialmente variável da carga, e;

4) Muitos autores analisam apenas um só cenário de operação da rede elétrica, de modo que os resultados podem não ser adequados para outro cenário com variações do nível de curto-circuito, e nos parâmetros dos filtros, por exemplo.

Para superar as limitações indicadas, foi desenvolvido um método matemático e uma ferramenta computacional para projetar a instalação de filtros harmônicos passivos utilizando otimização multiobjetivo que tem as seguintes novidades ou contribuições:

1) Nova formulação matemática do problema de otimização multiobjetivo que garanta a eficácia econômica da solução, considerando o sistema de tarifas elétricas do Brasil, como a redução dos indicadores de distorção harmônica em conformidade com as restrições adequadas para o problema segundo as normas pertinentes, e;

2) A implementação computacional de um método de solução para essa formulação que, além de determinar os parâmetros de projeto para os filtros harmônicos passivos utilizando um método moderno de programação evolucionária multiobjetivo, apresentam as seguintes novidades:

- ✓ Otimiza não só os parâmetros que caracterizam os filtros, mas também seleciona o tipo de configuração e o número de ramos em cada barra candidata de acordo com um conjunto de configurações pré-estabelecidas no programa;
- ✓ Têm-se programado duas normas possíveis para avaliar as restrições de qualidade de energia (PRODIST- Modulo 8 ou IEEE 519-92), que podem ser escolhidos à vontade pelo usuário, e;
- ✓ A otimização determina soluções com bons indicadores de desempenho para vários cenários característicos e não característicos do sistema, que permitem representar: as variações diárias da carga, variações dos espectros harmônicos gerados pelas cargas não lineares, variações na impedância da rede de alimentação externa, variações na indutância e capacitância dos filtros, etc.

Tendo em conta o elevado ritmo de crescimento econômico do PIM, tem-se observado a introdução de novas tecnologias da eletrônica e telecomunicações nos processos de automatização das indústrias, da mesma forma que cresce a presença de cargas que, por suas características não lineares, incide diretamente nos índices de qualidade de energia nestas instalações. A necessidade de manter um elevado fator de potência conjuntamente com a manutenção dos parâmetros de qualidade de energia é uma questão do ponto de vista da eficiência energética que impacta nos índices de rentabilidade das indústrias. A aplicação dos resultados obtidos nesta tese, sem dúvida, constituem um aporte e uma ferramenta valiosa para realizar estudos afins com esta problemática.

1.5 Estado da Arte - Pesquisas Correlatas

1.5.1 Introdução

Os filtros harmônicos passivos do tipo paralelo são dispositivos cuja função é “curto-circuitar” as correntes harmônicas tão próximo quanto possível da fonte de distorção, ou seja, das cargas não lineares (Dugan *et. al*, 2004).

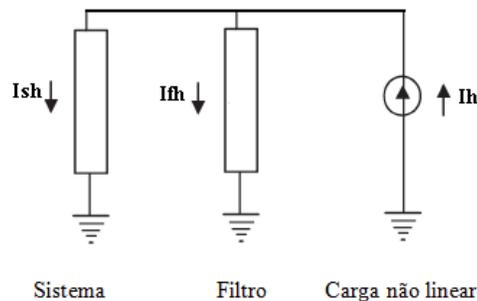


Figura 1.1: Efeito do filtro

Na prática é impossível “curto-circuitar” a corrente harmônica de ordem I_h , da carga não linear, e o que se produz na Figura 1.1 é uma divisão desta corrente em: a corrente pelo filtro I_{fh} e a corrente pelo sistema I_{sh} de acordo com a equação (1.1).

$$I_h = I_{sh} + I_{fh} \quad (1.1)$$

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 comum do filtro.

Existem múltiplos tipos de cargas não lineares que produzem espectros característicos de correntes harmônicas de múltiplas frequências. Portanto, os filtros devem ser capazes de “eliminar” não um harmônico em particular, mas vários harmônicos ou uma gama de frequências contíguas (Dugan *et. al*, 2004); (Arrillaga & Watson, 2003).

Os filtros sintonizados do tipo apresentado na Figura 1.2 são utilizados para “eliminar” uma só frequência, pois são filtros de sintonia fina, onde o que se controla é o fator de qualidade Q com que se projeta o filtro (Arrillaga & Watson, 2003); (Nassif & Xu, 2007).



Figura: 1.2. Filtro sintonizado

Os filtros amortecidos apresentados na Figura 1.3 são usados para “eliminar” uma gama de frequências e os mesmos têm uma característica suave de impedância versus frequência cuja forma é também determinada pelo fator de qualidade do filtro.

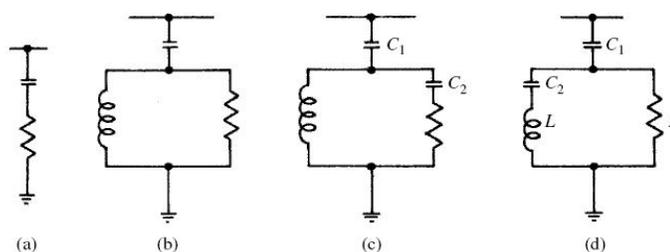


Figura 1.3: Filtros amortecidos. (a) 1ª ordem, (b) 2ª ordem, (c) 3ª ordem, (d) tipo C

Nassif & Xu (2007) realizaram um estudo dos diferentes tipos de filtros passivos quanto a suas características de impedância versus frequência e a influência da possibilidade de envelhecimento da indutância e da capacitância dos filtros em seu desempenho.

Deste estudo se conclui que os filtros sintonizados são muito mais afetados pelo envelhecimento de seus parâmetros que os amortecidos.

Uma metodologia para avaliar a eficiência dos filtros foi apresentada. Ela “mede” a eficiência como a redução relativa da Distorção Harmônica Total (*THD*) da corrente e da tensão no ponto onde se conecta o filtro em (Czarnecki & Ginn, 2002 e 2005).

A eficiência do filtro com respeito a sua função de redução da distorção harmônica total de corrente (ε_i) é calculada como mostra a equação (1.2).

$$\varepsilon_i = \frac{THD(I_s^0) - THD(I_s)}{THD(I_s^0)} \quad (1.2)$$

Onde I_s^0 é a corrente que chega ao ponto de conexão do filtro da Figura 1.1 antes da conexão deste e I_s é a corrente resultante da conexão do filtro.

Entretanto, a eficiência do filtro com relação a sua função de redução da distorção de tensão (ε_v) é calculada conforme a equação (1.3).

$$\varepsilon_v = \frac{THD(V^0) - THD(V)}{THD(V^0)} \quad (1.3)$$

Onde V^0 é a tensão no ponto de conexão do filtro da Figura 1.1 antes da conexão deste e V é a tensão resultante da conexão.

Como os filtros sintonizados apenas “eliminam” uma frequência determinada, normalmente pode-se formar um conjunto de filtros sintonizados como apresentados na Figura 1.4 que pode incluir filtros amortecidos.

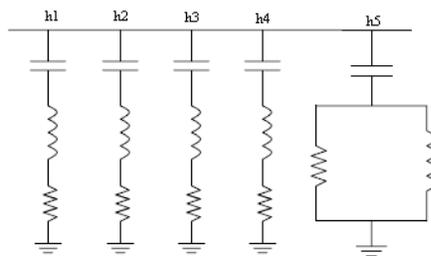


Figura 1.4: Conjunto de filtros passivos

Neste caso, surge o problema de como distribuir a potência reativa total do filtro entre os diferentes ramos do mesmo. A solução tradicional para este problema está em usar capacitores iguais nos diferentes ramos. No entanto, a distribuição da potência reativa entre os ramos influi

decisivamente na eficiência do filtro, já que as magnitudes dos diferentes harmônicos a filtrar são diferentes (Arrillaga & Watson (2003); Czarnecki & Ginn (2002 e 2005)).

Dugan *et. al* (2004) e Buddingh (2002), afirmam que uma particularidade importante dos filtros sintonizados, é que estes criam um pico de ressonância paralelo com a impedância equivalente do sistema a uma frequência inferior a sua frequência de sintonia como mostra a Figura 1.5.

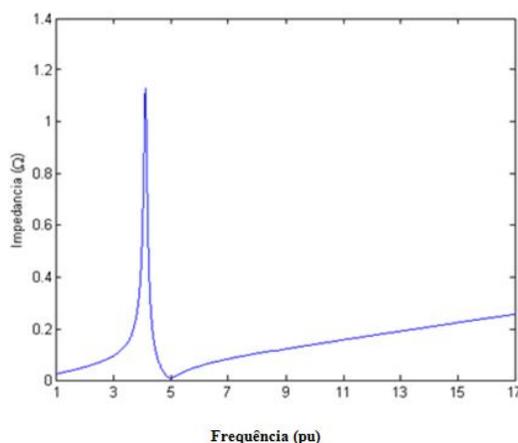


Figura 1.5: Ressonância paralela

Este pico de ressonância deve estar longe de qualquer harmônico significativo. Devido a isto, os filtros comumente são sintonizados em uma frequência ligeiramente inferior a frequência h que se queira “eliminar” como margem de segurança para evitar que a variação dos parâmetros do filtro eleve a frequência do pico de ressonância da frequência h .

Dugan *et. al*, (2004) recomendam adicionar filtros começando pelo harmônico significativo de mais baixa ordem do sistema para evitar problemas com este pico de ressonância. Entretanto, para instalar um filtro de sétimo harmônico, deve existir também um filtro de quinto harmônico.

No caso contrário a esta prática que é descrito, é a coexistência de filtros de harmônicos em paralelo a bancos de capacitores de correção do fator de potência. Não obstante, normalmente este tipo de compensação deve ser evitado devido ao impacto negativo dos bancos de capacitores (Varetsky & Hanzelka, 2009).

Várias contribuições são dedicadas a determinar a localização mais apropriada dos filtros no sistema elétrico. Em geral, estas contribuições usam indicadores de sensibilidade da distorção harmônica na conexão de filtros para desenvolver uma estratégia para a localização dos mesmos (Teng Au & Milanovic (2007); Swarnkar, Gupta & Niazi (2009); Philip, Young-June Shin & Dougal, 2012).

Como se sabe, o filtro limita a circulação de correntes harmônicas do ponto que está localizado até a fonte, como também pode melhorar a qualidade da tensão em todos os nós. Portanto, se destaca a importância de selecionar localizações em que a impedância do sistema externo seja bastante estável (Arrillaga & Watson, 2004).

1.5.2 Otimização de filtros de harmônicos

Vários autores têm tratado a otimização de filtros passivos. Métodos de otimização como: “*Sequential Quadratic Programming (SQP)*” (Ghiasi, Rashtchi & Hoseini, 2008), “*Simulated Annealing (SA)*” (Hsiao, 2001), “*Differential Evolution (DE)*” (Price; Storn & Lampinen, 1997), “*Artificial Neural Networks (ANN)*” (Aytug, Khouja & Vergara, 2009), “*Particle Swarm Optimization (PSO)*” (Chang & Chang, 1998), Algoritmo Genético (Chang, 2005), etc, estão sendo usados para a otimização de certas configurações de filtros passivos.

Diferentes pontos de vista são usados para formular o problema do projeto destes filtros. Estas formulações podem ser classificadas em: formulações mono objetivo e multiobjetivo.

1.5.3 Formulações mono objetivo

As formulações mono objetivo fundamentam a determinação dos parâmetros do conjunto de filtro, por meio da otimização de uma função objetivo dada, sujeita a um conjunto de restrições (Li, Li, Luo, Zeng & He, 2012). Algumas destas formulações são discutidas a seguir:

Haozhong Cheng *et. al.* (1995), apresentam a determinação de um conjunto de filtros sintonizados com dois critérios diferentes:

1) Mínima potência reativa à frequência fundamental Q_{s1} sujeito a um nível máximo de distorção total da tensão $THDV$;

2) Mínima distorção total da tensão sujeito a cumprir um nível desejado de potência reativa a frequência fundamental.

Chang & Chang (1998), formulam o problema de planejamento de filtros passivos sintonizados em sistemas elétricos de distribuição a partir da minimização de uma função de custo f dada de acordo com a equação (1.4):

$$\min \{ f = C_P + C_F \} \quad (1.4)$$

Onde C_P representa o custo anual das perdas de energia considerando vários níveis de carga do sistema e C_F o custo dos filtros sintonizados a se instalar.

Evidentemente, para reunir nesta função, o custo anual de perdas com o custo de investimento dos filtros, este tem que ser considerado em uma base anual.

Como restrições ao problema consideram-se a limitação da tensão V em cada nó a um intervalo permissível, assim como a distorção harmônica total de tensão $THDV$ em cada nó a um valor menor que o valor máximo pré-estabelecido conforme as restrições (1.5) e (1.6).

$$V_i(\min) \leq V_i \leq V_i(\max) \quad (1.5)$$

$$THDV_i \leq THDV(\max) \quad (1.6)$$

Chang & Chang (1998), usam o método de Evolução Diferencial para solucionar o problema de variáveis discretas.

Hsiao (2001) utilizou o método de “*Simulated Annealing*” para otimizar uma função objetivo declarada como a soma dos custos de investimento e o custo de instalação K_i de um conjunto de filtros sintonizados como mostra a equação (1.7).

$$\min \left\{ f = K_i + \sum_h K_{c_h} Q_{c_h} + K_{l_h} Q_{l_h} \right\} \quad (1.7)$$

O custo de cada filtro é considerado proporcional (K_{c_h} , K_{l_h}) à potência reativa do capacitor (Q_{c_h}) e do indutor (Q_{l_h}).

Como restrições ao problema voltam-se a incluir as restrições (1.5) e (1.6) para a tensão e o $THDV$ em cada nó, entretanto, adicionam-se outras duas restrições: a primeira relativa à distorção total da corrente $THDI$ no ponto de conexão comum (PCC), e a segunda é relativa a

potência reativa total na frequência fundamental dos filtros Q_{F_1} de acordo com a equação (1.8) e (1.9).

$$THDI \leq THDI(\max) \quad (1.8)$$

$$Q_{F_1}(\min) \leq Q_{F_1} \leq Q_{F_1}(\max) \quad (1.9)$$

Nesta contribuição, não se consideram os diferentes níveis de carga ou de operação para o sistema elétrico.

Abril & Quintero (2003), formulam o problema 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.

Considerando um período de avaliação de N anos com uma taxa de juros i , o *VPL* do projeto de compensação de potência reativa é calculado por meio da equação (1.10):

$$\max \left\{ f = VPL = -C_F + \sum_{k=1}^N (C_P^0 - C_P)/(1+i)^k \right\} \quad (1.10)$$

Como restrições ao problema, utilizam-se as restrições (1.5) e (1.6) para a tensão e o *THDV* em cada nó e neste caso adiciona-se uma restrição para distorção individual da tensão *IHDV* em cada nó de acordo com a equação (1.11).

$$V_{i,h} / V_{i,1} \leq IHDV(\max) \quad (1.11)$$

Nesta contribuição, é utilizado o método de Programação Quadrática Sequencial para o problema de otimização, apresentando bons resultados.

Ghiasi, Rashtchi & Hoseini (2008), formularam o problema, como a minimização do custo total dos filtros sintonizados, os quais são selecionados e localizados em um circuito de distribuição. Neste sentido, usam uma função objetivo semelhante a da equação (1.7). Aqui é utilizado um Algoritmo Genético Simples (SGA) onde as restrições de *THDV* máximo (1.6) e *IHDV* máximo (1.11) são incluídas mediante a uma função de penalidade (Ghiasi, Rashtchi & Hoseini, 2008).

Zobaa (2005) também utiliza uma função de custo semelhante à equação (1.7) para tratar da determinação de um único filtro sintonizado para compensar uma carga não linear e ao mesmo

tempo garantir um fator de potência superior a 90% mediante a restrição expressa na relação (1.12):

$$PF_1 \geq 0.9 \quad (1.12)$$

Um detalhe interessante desta abordagem é o uso de um conjunto de restrições para evitar a ressonância da impedância equivalente do sistema Z_{eq_h} , para qualquer frequência harmônica presente no espectro da carga não linear. Devido à simplicidade do circuito, este tipo de restrição pode ser incluído para evitar a aparição de uma reatância equivalente X_{eq_h} igual à zero (condição de ressonância) como mostra a relação (1.13):

$$X_{eq_h} \neq 0 \quad (1.13)$$

Zobaa (2005) introduz restrições adicionais para evitar a sobrecarga do capacitor do filtro por sobre tensão no valor eficaz e no valor de pico $V_{c_{pico}}$. O método de otimização utilizado neste caso é o de “*Golden Section Search*” levando-se em conta as restrições (1.14) e (1.15).

$$V_c \leq 1.1V_{c_{nom}} \quad (1.14)$$

$$V_{c_{pico}} \leq 1.1\sqrt{2} \cdot V_{c_{nom}} \quad (1.15)$$

Onde V_c é a tensão de capacitor e $V_{c_{nom}}$ é a tensão nominal do capacitor.

Zobaa (2006) publicou uma nova versão de sua abordagem que completa agora as restrições necessárias para evitar a sobrecarga do capacitor por corrente I_c e por potência reativa Q_c de acordo aos limites da IEEE Std 18-1992 (IEEE, 1992) conforme as equações (1.16) e (1.17).

$$I_c \leq 1.8I_{c_{nom}} \quad (1.16)$$

$$Q_c \leq 1.35Q_{c_{nom}} \quad (1.17)$$

Onde I_c é a corrente do capacitor e $I_{c_{nom}}$ é a corrente nominal do capacitor e Q_c é a potência reativa do capacitor e $Q_{c_{nom}}$ é a potência nominal do capacitor.

Sua nova função de custo a minimizar apresentada na equação (1.18) 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 como está na equação (1.18).

$$\min \left\{ f = C_P + \left(\frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \right) C_F \right\} \quad (1.18)$$

Ruihua, Yuhong & Yaohua (2008) 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.

Como restrições utilizam o máximo *THDV* (1.6), *IHDV* (1.11) e a máxima distorção individual de corrente *IHDI*. Para a solução do problema utilizam um Algoritmo Genético Simples (SGA) (1.19):

$$I_h / I_1 \leq IHDI(\max) \quad (1.19)$$

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

Chang *et. al* (2009) determinam um conjunto de filtros sintonizados para a minimização do custo dos mesmos sujeitos a restrições de qualidade da energia e saturação dos filtros. A parte distintiva deste trabalho consiste em análises probabilísticas que se usam para considerar as variações nas fontes de harmônicos e na impedância do sistema.

Hong & Chiu (2010) 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. Utilizam o método “*Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation*” (*SPSA*).

Zobaa *et. al.* (2010) tratam o problema de determinar as variações dos parâmetros de um filtro sintonizado para adaptarem-se as variações dinâmicas da carga. A otimização se realiza para um dos critérios possíveis: mínimas perdas no sistema com máximo fator de potência.

Kovernikoval & Chi Thanh (2012) apresentam o cálculo dos parâmetros de diferentes tipos de filtros para sistemas de alta tensão que atendam uma potência reativa especificada na frequência fundamental.

Como função objetivo a minimizar, usa-se as perdas nos filtros, onde I_{Fh} e R_{Fh} são a corrente e resistência do filtro harmônico h , de acordo com a equação (1.20).

$$\min \left\{ f = P_F = \sum_h I_{F_h}^2 R_{F_h} \right\} \quad (1.20)$$

Como restrições estabelecem um intervalo válido para as tensões harmônicas com respeito à tensão nominal em cada nó como mostra a equação (1.21). A otimização é realizada com a técnica de “*Particle Swarm Optimization*”.

$$V_h(\min) / V_{nom} \leq V_{i,h} / V_{nom} \leq V_h(\max) / V_{nom} \quad (1.21)$$

Abdel Aleem *et. al* (2012) publicaram a otimização de um filtro tipo C para mínima distorção de tensão *THDV*, sujeito as restrições de qualidade de energia, saturação do filtro e fator de potência desejado, utilizando a função objetivo (1.22).

$$\min \{ f = THDV \} \quad (1.22)$$

Pandi *et. al* (2012) apresentam a otimização dos filtros sintonizados e de segunda ordem com a idéia de minimizar o máximo *THDV* de todos os nós do sistema, conforme (1.23). Este trabalho usa o método de “*Particle Swarm Optimization*” para resolver o problema.

$$\min \{ f = \max_k \{ THDV_k \} \} \quad (1.23)$$

Ertay *et. al*, (2012) utilizaram o método de “*Simulated Annealing*” como otimizador da função objetivo para minimizar a soma das correntes harmônicas no PCC de acordo com a equação (1.24).

$$\min \left\{ f = \sum_h I_{s_h} \right\} \quad (1.24)$$

1.5.4 Formulações multiobjetivo

Chang & Wu (2004) apresentam uma formulação de otimização multiobjetivo para filtros de diversos tipos, que é baseado em três objetivos fundamentais a minimizar: a distorção total da demanda de corrente *TDD* no PCC, o *THDV* das tensões nos nós do sistema e as perdas dos filtros P_F .

Estes três objetivos se unem em uma só função objetivo dada pela equação 1.25:

$$\min \left\{ f = a \cdot TDD + \sum_i b \cdot THDV_i + c \cdot P_F \right\} \quad (1.25)$$

Onde as constantes a , b e c , que são fornecidas pelo usuário, determinam a importância relativa de cada um dos objetivos a minimizar.

As restrições consideradas incluem as normas estabelecidas pelo IEEE Std. 519-92, ou seja: as restrições de máximo $THDV$ (1.6) e da distorção individual (1.11) das tensões, assim como as restrições de máxima TDD e máxima distorção individual da demanda de corrente no PCC, conforme as relações (1.26) e (1.27) (IEEE, 1993), onde I_L é a corrente média máxima da instalação industrial pelo período anual.

$$TDD \leq TDD(\max) \quad (1.26)$$

$$I_h / I_L \leq IDD_h(\max) \quad (1.27)$$

Chang *et. al.* (2005) continuam 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 minimizar: distorção total da corrente $THDI$ no PCC, máxima distorção total de tensão $THDV$ no sistema e o custo dos filtros sintonizados a utilizar conforme as relações expressas em (1.28).

$$\begin{aligned} \min \{ f_1 = THDI \} \\ \min \{ f_2 = \max_k \{ THDV_k \} \} \\ \min \{ f_3 = C_F \} \end{aligned} \quad (1.28)$$

O problema se resolve com um procedimento baseado em técnicas “fuzzy” e no método de “*Simulated Annealing*”.

Chang *et. al.* (2007) regressam ao problema apresentado por Chang & Wu, (2004); Chang, Tseng & Tsao (2005), utilizando Redes Neurais Sequenciais e Arranjos Ortogonais para sua solução.

Na He *et. al* (2007) apresentam uma formulação semelhante aquela expressa em (1.28), com uma só substituição da função de máxima distorção de tensão para a potência reativa total da fundamental que neste caso se maximiza, como mostra a equação 1.29:

$$\begin{aligned} \min \{f_1 = THDI\} \\ \min \{f_2 = C_F\} \\ \max \{f_3 = Q_{F1}\} \end{aligned} \quad (1.29)$$

Esta formulação se resolve com o uso do método de “*Particle Swarm Optimization*”.

Na He & Xu (2008 e 2009) apresentam uma formulação idêntica a (1.29). 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 do tipo (1.13) para evitar ressonâncias no sistema.

Ko Chia-Nan *et. al* (2009) regressam às formulações de Chang & Wu (2004); de Chang, Tseng & Tsao (2005) e Chang Low & Wu (2007) com a modificação de adicionar as perdas dos filtros ao problema de acordo com a equação (1.30), onde W_i , são pesos arbitrários escolhidos por especialistas.

$$\min \left\{ f = \sum_{i=1}^n w_i \cdot THDV_i + w_{n+1} \cdot TDD + w_{n+2} \cdot P_F + w_{n+3} \cdot P_F \right\} \quad (1.30)$$

A solução é realizada pelo método “*Particle Swarm Optimization*” com “*Nonlinear Time-varying Evolution*” (*PSO-NTVE*).

Sharaf & Adel (2009) apresentam um método, utilizando a técnica de “*Discrete Particle Swarm Optimization (DPSO)*”, que minimiza uma função composta por vários objetivos: mínima corrente de distorção I_{s_h} no sistema, máxima corrente de harmônicos I_{f_h} 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 à do filtro como mostra a relação (1.31).

$$\min \left\{ f = \alpha_1 (I_{s_h} / I_h) + \alpha_2 / (I_{f_h} / I_h) + \alpha_3 (V_h / I_h) + \alpha_4 (I_{s_h} / I_{f_h})^2 \right\} \quad (1.31)$$

Em outra contribuição, Sharaf & Adel (2009), utilizam o método “*Discrete Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)*” e reformulam o problema mediante as três funções objetivas seguintes (1.32):

$$\begin{aligned} \min \{f_1 = I_{s_h} / I_h\} \\ \max \{f_2 = I_{F_h} / I_h\} \\ \min \{f_3 = V_h / I_h\} \end{aligned} \quad (1.32)$$

Maza-Ortega *et. al.* (2010 e 2011) apresentaram um programa 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. Neste caso, expressam rigorosamente um conjunto de restrições para evitar ressonâncias do sistema com os filtros.

Verma Vishal & Singh (2010) apresentam uma função objetivo composta para ser otimizada com um Algoritmo Genético Simples (SGA). Esta função inclui a minimização da corrente de harmônicos I_{s_h} do sistema, da corrente na frequência fundamental no filtro (equivale a minimizar a admitância do filtro a essa frequência $1/Z_{F1}$) e a diferença entre a potência reativa desejada a frequência fundamental Q_{S1} e a soma de potência reativa gerada por cada filtro k , $Q_{F_{k,1}}$, como apresentado na relação (1.33), onde α e β são pesos arbitrários escolhidos por especialistas.

$$\min \left\{ f = \sqrt{\sum_h \left(I_{s_h} + \frac{\alpha}{Z_{F1}} + \beta \left(Q_{S1} - \sum_k Q_{F_{k,1}} \right)^2 \right)^2} \right\} \quad (1.33)$$

Outra função objetivo composta é apresentada para ser resolvida com “*Ant Colony Optimization (ACO)*”. A mesma inclui o custo dos filtros sintonizados e o *THDI* da corrente no PCC, conforme (1.34) (Dehini & Sefiane, (2011)).

$$\min \{f = C_F + THDI\} \quad (1.34)$$

Singh Bhim & Sanjeev & (2011) utilizam um algoritmo baseado em PSO para maximizar uma função objetivo que compreende a média do fator de potência FP_k e a redução do *THDI*_{*k*} para um conjunto de M níveis de carga diferentes como segue na expressão (1.35), onde W_i , são

pesos arbitrários escolhidos por especialistas. A otimização se realiza para filtros sintonizados e de segunda ordem para conversores de 12 pulsos.

$$\max \left\{ f = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M (w_1 P_{F_k} + w_2 (1 - THDI_k)) \right\} \quad (1.35)$$

Hao Yue *et. al* (2011) apresentam uma aplicação do Algoritmo Genético por Ordenamento Não-dominado (NSGA-II) ao problema dos filtros harmônicos. A formulação utilizada inclui a minimização do custo dos filtros C_F e das perdas na rede ΔP , conforme (1.36).

$$\begin{aligned} \min \{ f_1 = C_F \} \\ \min \{ f_2 = \Delta P \} \end{aligned} \quad (1.36)$$

Li Shengqing *et. al* (2012) aplicam o método de “*Multi-island PSO*” para otimizar uma formulação com quatro objetivos diferentes: maximizar a potência reativa a frequência fundamental, assim como minimizar o $THDI$, o $THDV$ e o custo dos filtros, como mostrado em (1.37).

$$\begin{aligned} \max \{ f_1 = Q_{F_1} \} \\ \min \{ f_2 = THDI \} \\ \min \{ f_3 = THDV \} \\ \min \{ f_4 = C_F \} \end{aligned} \quad (1.37)$$

Finalmente, Ji Junpeng *et. al.* (2012), apresentam outra aplicação do método de PSO para resolver uma formulação multiobjetivo composta por três funções a minimizar: o custo dos filtros, o negativo da potência reativa à frequência fundamental, e uma soma ponderada das distorções totais de tensão e corrente, conforme as expressões (1.38), onde C é uma constante de alto valor para que f_2 sempre seja positiva, e α_1 e α_2 são pesos arbitrários escolhidos por especialistas.

$$\begin{aligned} \min \{ f_1 = C_F \} \\ \min \{ f_2 = C - C_{F_1} \} \\ \max \{ f_3 = \alpha_1 \cdot THDV + \alpha_2 \cdot THDI \} \end{aligned} \quad (1.38)$$

Onde C é uma constante de alto valor para que f_2 sempre seja positiva.

1.4 Estrutura da Tese

No **capítulo 1**, introdução, são apresentados, de forma sucinta, os elementos que motivaram à realização deste trabalho, juntamente com os objetivos, a relevância e contribuição da tese e o estado da arte por meio de pesquisas correlatas. Ao longo dos próximos capítulos, são descritos com detalhes os elementos necessários à composição dos modelos matemáticos propostos neste trabalho assim como o desenvolvimento dos métodos e algoritmos computacionais.

No **capítulo 2**, analisam-se aspectos relacionados com as normas de qualidade de energia, considerando as recomendações do IEC, IEEE e PRODIST/MODULO 8/ANEEL.

O **capítulo 3** está orientado ao estudo dos filtros harmônicos passivos, apresentando os filtros sintonizados, variações dos parâmetros, os distintos tipos de filtros amortecidos, as expressões do projeto e dos componentes de custos dos filtros.

O **capítulo 4** apresenta os modelos dos componentes do sistema como transformadores, alimentadores, máquinas rotativas, cargas passivas, entre outros elementos, assim como as técnicas de varredura de frequência, fluxos de harmônicos empregados em análises da propagação de harmônicos em redes elétricas.

O **capítulo 5** aborda a aplicação da otimização multiobjetivo de filtros passivos mostrando a formulação matemática do problema e sua implementação por meio do algoritmo NSGA-II de otimização multiobjetivo. Se realiza uma descrição do algoritmo de otimização geral e de cada uma das funções fundamentais desenvolvidas. Além disso, mostram-se vários exemplos de aplicação.

Finalmente, no **capítulo 6**, apresentam-se as conclusões proporcionadas pelos resultados da tese e as recomendações para possíveis desdobramentos e aplicações futuras. Ainda fazem parte desta tese alguns anexos contendo parâmetros do sistema para simulação e a relação de artigos publicados durante o desenvolvimento desta pesquisa.

CAPÍTULO II

NORMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA

2.1 Introdução

As normas de qualidade de energia compreendem um conjunto de regulações que estabelecem os limites de qualidade que o sistema elétrico deve cumprir para oferecer um bom serviço elétrico aos consumidores.

Existem normas internacionais e nacionais para o controle da distorção das formas de onda de tensão e 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).

Vale ressaltar que a estrita observância dos limites recomendados pelas normas não necessariamente eliminam os problemas, particularmente quando os sistemas estão operando perto dos limites (Arrillaga & Watson, 2003).

2.2 Norma IEC 61000-3-6 de Compatibilidade Eletromagnética

A série 61000 da IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional) compreende um amplo conjunto de regulações sobre a qualidade de energia. Em particular, a IEC 61000-3-6 (IEC/TR, 61000-3-6, 2008) estabelece os limites de emissão de harmônicos para as instalações conectadas a sistemas elétricos de potência. Para a tensão elétrica esta norma define:

1) A Distorção Harmônica Total de Tensão (%THDV). Calculada como a relação entre a tensão *rms* dos harmônicos superiores considerados e a tensão fundamental (V_1), apresentado em (2.1).

$$\%THDV = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} 100 \quad (2.1)$$

2) A Distorção Harmônica Individual de tensão de ordem h (%IHDV _{h}). Calculada como a relação entre a tensão de um harmônico individual (V_h) e a tensão fundamental de acordo com (2.2).

$$\% IHDV_h = \frac{V_h}{V_1} 100 \quad (2.2)$$

A referência (IEC/TR 61000-3-6, 2008) estabelece dois tipos de limites: (1) níveis de compatibilidade como é mostrado na Tabela 2.1 e (2) níveis de planejamento, como apresentado na Tabela 2.2. Quando as emissões de harmônicos das cargas não lineares não superam os níveis de compatibilidade estabelecidos, assegura-se uma boa qualidade de energia. Por outro lado, os níveis de planejamento (mais restritivos que os de compatibilidade) são seguidos como guias para o planejamento do sistema e os mesmos asseguram o cumprimento dos níveis de compatibilidade.

Tabela 2.1 – Níveis de compatibilidade para as tensões harmônicas individuais em redes de baixa (BT) e média tensão (MT).

Ímpares não múltiplas de 3		Ímpares múltiplas de 3		Pares	
Ordem de Harmônico h	Tensão Harmônica %	Ordem de Harmônico h	Tensão Harmônica %	Ordem de Harmônico h	Tensão Harmônica %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3	21	0.3	8	0.5
$17 \leq h \leq 49$	$2.27(17/h) - 0.27$	$21 \leq h \leq 45$	0.2	$10 \leq h \leq 50$	$0.25(10/h) + 0.25$

Fonte: (IEC/TR 61000-3-6, 2008).

Os limites de harmônicos de tensão são estabelecidos para evitar os efeitos nocivos dos harmônicos em regime permanente e em curto prazo que se define como:

- 1) Efeitos de regime permanente são relacionados fundamentalmente a efeitos térmicos em capacitores, cabos, transformadores, motores e outros, e são medidos em média a intervalo de 10 minutos.
- 2) Efeitos a curto prazo que se manifestam em equipamentos eletrônicos sensíveis a níveis de harmônicos tendo como intervalo de interesse para registro a faixa de 3 segundos ou menos.

O nível de compatibilidade do THDV para média e baixa tensão é de 8% para harmônicos de regime permanente (intervalos de 10 minutos) e de 11% para harmônicos de curta duração (intervalos menores que 3 segundos).

Os limites de compatibilidade da Tabela 2.1 e de planejamento da Tabela 2.2 para as tensões harmônicas individuais são válidos para harmônicos estacionários. Estes limites devem ser modificados pelo fator K_{hvs} para ser utilizados com harmônicos de curta duração conforme (2.3).

$$K_{hvs} = 1.3 + 0.7 \frac{h-5}{45} \quad (2.3)$$

Tabela 2.2 – Níveis de planejamento para tensões harmônicas individuais em redes de média (MT), alta (AT) e extra-alta tensão (EHT).

Ímpares não múltiplas de 3			Ímpares múltiplas de 3			Pares		
Ordem de Harmônico h	Tensão Harmônica h %		Ordem de Harmônico h	Tensão Harmônica %		Ordem de Harmônico h	Tensão Harmônica %	
	MT	AT-EHT		MT	AT-EHT		MT	AT-EHT
5	5	2	3	4	2	2	1.8	1.4
7	4	2	9	1.2	1	4	1	0.8
11	3	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.4
13	2.5	1.5	21	0.2	0.2	8	0.5	0.4
$17 \leq h \leq 49$	$1.9(17/h)-0.2$	$1.2(17/h)$	$21 \leq h \leq 45$	0.2	0.2	$10 \leq h \leq 50$	$0.25(10/h)+0.22$	$0.19(10/h)+0.16$

Fonte: (IEC/TR 61000-3-6, 2008).

Esta norma não estabelece explicitamente limites para a distorção da corrente no PCC, no entanto, a mesma contempla a possibilidade de converter os limites de distorção para a tensão em limites de distorção para a corrente ao utilizar a impedância em frequências harmônicas do sistema externo de energia.

2.2.1 Metodologia de aplicação

Com respeito as características das medições utilizadas, para comprovar o cumprimento dos níveis de compatibilidade do planejamento, estas devem se realizar com o intervalo mínimo de uma semana, que compreenda o período de operação onde se espera os maiores níveis de emissão de harmônicos.

Para os fins de planejamento deve-se levar em consideração no curto prazo, os indicadores a seguir:

- 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).

Por outro lado, 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);
- 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 a bancos de capacitores para responder as variações da carga.

2.3 Norma IEEE Std. 519 – 92

Essa norma é chamada de "práticas recomendadas e requisitos da norma (IEEE, 1992) para o controle de harmônicos em sistemas elétricos de potência". É caracterizada por estabelecer

os limites para ambos, não só a distorção da tensão fornecida pelo distribuidor, como também a corrente de carga do consumidor (IEEE Std. 519, 1992).

Limites de harmônicas da norma IEEE 519 foram estabelecidas para o PCC (Figura 2.1) entre a concessionária e vários consumidores. Assim, este é o ponto em que outros consumidores podem ser alimentados.

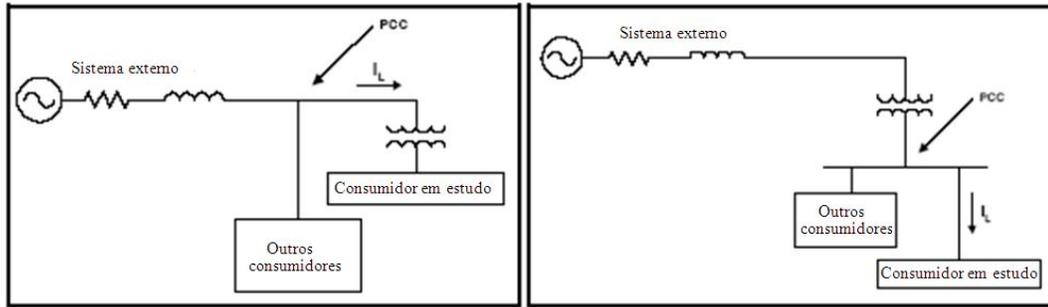


Figura 2.1: Ponto de conexão comum (PCC).

Do ponto de vista da distorção da tensão, a concessionária é responsável por manter a qualidade da forma de onda de tensão no PCC, abaixo dos limites máximos de regime permanente apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Limites de distorção de tensão

Tensão No PCC	Distorção Individual de Tensão (%)	Distorção Total de Tensão THDV (%)
$V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$V > 161 \text{ kV}$	1.0	1.5

Fonte: IEEE Std. 519-92.

Estes limites devem ser cumpridos para a pior condição de operação do sistema com duração mais de uma hora. Para períodos de curto prazo, durante as condições iniciais ou transitórias, esses limites podem ser ultrapassados em 50%. Os limites de distorção de corrente especificados na Tabela 2.4, dependem da relação que existe entre a carga do consumidor (I_L) e a corrente de curto-circuito (I_{sc}) no PCC. Um elevado I_{sc}/I_L significa que o sistema tem uma maior imunidade para absorver as emissões de harmônicas da carga e dessa forma pode admitir níveis de distorção harmônica mais elevados. Os limites de correntes harmônicas são estabelecidos pelos indicadores apresentados a seguir:

1) A distorção da demanda total (%TDD), calculada como a razão entre a corrente *rms* de harmônicos mais elevados considerados e a corrente de carga máxima conforme equação (2.4).

$$\%TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} 100 \quad (2.4)$$

2) Distorção harmônica individual da demanda ($IDD_h\%$), calculada como a relação entre a corrente de um harmônico individual (I_h) e a corrente de carga máxima de acordo com equação (2.5).

$$\%IDD_h = \frac{I_h}{I_L} 100 \quad (2.5)$$

Tabela 2.4: Limites de distorção da corrente no PCC

V ≤ 69 kV						
I _{sc} /I _L	h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
69 kV < V ≤ 161 kV						
< 20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
V > 161 kV						
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Fonte: IEEE Std. 519-92.

A Tabela 2.4 complementa-se com os seguintes elementos:

- I_{sc} é a corrente de fase do curto-circuito trifásico no PCC;
- I_L é a corrente máxima de demanda do consumidor calculada como a média das registradas nos últimos 12 meses;
- Os limites da Tabela 2.4 são para os harmônicos ímpares, enquanto os harmônicos pares limitam-se a 25% dos limites dessa tabela;

- Não se permite distorção provocada por circulação de corrente contínua, e;
- Todos os equipamentos de geração de energia elétrica devem ser limitados aos valores mínimos de distorção, independente da relação I_{sc} / I_L .

Os limites de distorção da corrente devem ser atendidos para a pior condição de operação do sistema com duração maior que uma hora. Para períodos de tempos mais curtos, durante as condições de inicialização ou condição transitória, estes podem ultrapassar 50%. Além disso, quando do uso de conversores com um número de pulsos $q > 6$, estes limites podem ser multiplicadas pelo fator $\sqrt{q/6}$.

2.3.1 Aplicação da Norma

A aplicação da norma (IEEE 519-92) implica realizar medições nas instalações de baixa tensão que podem estar em locais diferentes, dependendo da sua caracterização como:

- 1) PCC: os limites das normas neste ponto sempre devem ser atendidos, portanto devem ser realizadas campanhas periódicas neste ponto;
- 2) Nós elétricos (Subestações): medições nestes pontos permitem analisar os problemas de harmônicos no sistema elétrico como um todo, e;
- 3) Cargas não lineares: estas medições são utilizadas para caracterizar as cargas em seus espectros de harmônicos e suas variabilidades temporais.

Para muitos consumidores, o PCC está no lado de alta tensão do transformador, sendo mais conveniente para a medição usar o lado de baixa tensão para utilizar os transformadores de corrente existentes na instalação.

As medições realizadas na baixa tensão são bastante precisas para avaliar as correntes harmônicas no primário (sempre considerando a conexão dos enrolamentos para referir estas medições no primário). Porém, estas medições não servem para avaliar as tensões, já que as medições de tensão no secundário (baixa tensão) não podem caracterizar a distorção existente no primário.

Devido à natureza variável dos harmônicos, não se pode avaliar os níveis harmônicos com apenas uma amostra. No entanto, a informação estatística que descreve os níveis harmônicos pode ser obtida com as amostras individuais separadas no tempo. A experiência tem mostrado

que as variações dos harmônicos podem ser caracterizadas em intervalos de menos de um mês, sendo medido por vários dias (ao menos uma semana) com amostras separadas no tempo usualmente de 10 em 10 minutos. Para caracterizar os harmônicos com uma variação rápida, deve-se escolher amostras em intervalos de tempo inferior a um segundo.

As medições devem ser realizadas para um período de operação normal da instalação industrial. Para instalações com grandes variações de um dia para outro, é recomendado aumentar o período de monitoramento. O monitoramento permanente dos níveis harmônicos pode ser usado para detectar condições anormais de distorção e avaliar o cumprimento dos limites regulamentados. Quando os níveis medidos ultrapassam o normal da instalação, deve-se processar manutenções na instalação ou sistema de modo a identificar as causas (falha de filtros, banco de capacitores, novas cargas não-lineares, etc.). É importante avaliar o impacto de diferentes condições nos níveis harmônicos, o que pode ser obtido com uma combinação de medições e simulações para as seguintes situações:

- 1) Efeito dos capacitores na instalação;
- 2) Efeito do filtro harmônico fora de serviço;
- 3) Efeito dos capacitores do sistema externo;
- 4) Efeito das fontes alternativas a partir do sistema externo;
- 5) Efeito das diferentes condições de carga, e;
- 6) Efeito dos consumidores próximos (instalações vizinhas) com produção significativa de harmônicos.

O resultado das medições pode ser representado em uma variedade de formas que são utilizadas com diferentes objetivos:

- 1) Instantâneos (*snapshots*): apresenta um gráfico da forma de onda e seu espectro harmônicos composto por magnitudes e fases. Elas são utilizadas para caracterizar as distorções das cargas em condições de carga leve, média e pesada;
- 2) Tendência temporal (*time trends*): mostra a variação dos níveis harmônicos ao longo de um período de tempo. Eles são utilizadas para avaliar os pulsos individuais de correntes harmônicos e a duração total em que a distorção excede um valor dado;
- 3) Histogramas de probabilidade. A probabilidade de que um nível harmônico seja excedido pode ser avaliado com histogramas e curvas de probabilidade acumulada. São

utilizados para determinar os níveis mais prováveis e sua variação. A forma do histograma pode prover informações sobre a carga e/ou do sistema, e;

4) Gráficos de Magnitude/Duração: provêm um método para apresentar a natureza variável dos harmônicos. Estes gráficos permitem avaliar diretamente os níveis não excedidos em 95% ou 99% do tempo, para um nível de TDD.

2.4 ANEEL - PRODIST - Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica

O objetivo desta norma é estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica - QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado.

Para a qualidade do produto, este módulo define a terminologia, caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos que possibilitem à ANEEL fixar padrões para os indicadores de QEE.

A Tabela 2.5 sintetiza a terminologia aplicável às formulações do cálculo de valores de referência para as distorções harmônicas. As expressões para o cálculo das grandezas %DIT_h e DTT% são iguais as já previamente definidas pelas normas IEC 61000 e IEEE Std. 519 para o %IHD_h e o %THD_h respectivamente.

Tabela 2.5: Terminologia

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	DIT _h %
Distorção harmônica total de tensão	DTT%
Tensão harmônica de ordem h	V _h
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	h _{máx}
Ordem harmônica mínima	h _{min}
Tensão fundamental medida	V ₁

Fonte: ANEEL – Prodist – Módulo 8.

Os valores de referência para as distorções harmônicas totais estão indicados na Tabela 2.6. Estes valores servem para referência do planejamento elétrico em termos de QEE e que, regulatoriamente, serão estabelecidos em resolução específica, após período experimental de coleta de dados.

Tabela 2.6: Valores de referência globais das distorções harmônicas totais
(em porcentagem da tensão fundamental)

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 Prodist-Módulo 8.

Por outro lado, devem ser obedecidos também os valores das distorções harmônicas individuais indicadas na Tabela 2.7.

Tabela 2.7: Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão
(em porcentagem da tensão fundamental)

Harmônicos	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 múltiplos 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 múltiplos 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 Prodist-Modulo 8.

2.4.1 Aplicação do PRODIST

Os sinais a serem monitorados devem utilizar sistemas de medição cujas informações coletadas possam ser processadas por meio de recurso computacional. A duração do monitoramento deve ser de pelo menos uma semana com registro a cada 10 minutos.

Para os sistemas elétricos trifásicos, as medições de distorção harmônica devem ser feitas através das tensões fase-neutro para sistemas estrela aterrada e fase-fase para as demais configurações.

Os instrumentos de medição devem observar o atendimento aos protocolos de medição e às normas técnicas vigentes.

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 ($h_{max} = 25$).

Os transformadores de potencial utilizados em um sistema trifásico devem ter as mesmas especificações e suas cargas devem corresponder a impedâncias semelhantes, e serem conectadas em Y-Y aterrado, independentemente do tipo ou classe de tensão. Para os casos sem conexão a terra pode ser utilizada como arranjos para os transformadores de potencial do tipo V.

2.5 Considerações

As principais normas internacionais são compatíveis com o padrão brasileiro, em todos os casos de indicadores de distorção total (DDT, THD) e distorção individual (DIT_h , IHD_h) dos níveis de tensão regulada, com diferenças apenas nos sistemas de classificação quanto à tensão e os limites específicos indicados em cada caso.

Deve-se notar que a norma IEEE 519, 1992 é a mais exigente em termos de distorção total, no entanto, nas normas IEC-61000-3-6, 2004 e ANEEL-PRODIST Modulo 8 são mais específicos os limites de distorção individuais os quais, são reduzidos na medida em que aumenta a ordem harmônica como uma indicação de que a frequência do harmônico influencia o efeito destes, no sistema elétrico e do respectivo equipamento conectado.

Estes limites de distorção total e individual da tensão, estabelecidos por diferentes normas, visam buscar um padrão de qualidade na tensão fornecida para todos os consumidores que estão ligados a instalação elétrica do sistema industrial. Assim, esses limites não devem ser excedidos em qualquer barra com consumidores conectados para qualquer condição de operação possível da rede e/ou carga.

Portanto, ao analisar as emissões das correntes harmônicas de um determinado consumidor, estas devem ser limitadas a valores que possam impedir a perturbação da qualidade de energia elétrica no sistema elétrico externo e, portanto, previne a extensão dos problemas de distorção a outros consumidores conectados ao PCC.

Seguindo as instruções das normas internacionais analisadas, a avaliação dos limites harmônicos deve considerar tanto as condições de regime permanente da rede elétrica e da carga, como outras condições possíveis e que pode estabelecer harmônicos não característicos ou intensificar as condições de distorção da rede considerada.

CAPÍTULO III

FILTROS HARMÔNICOS PASSIVOS

3.1 Introdução

Quando se projeta uma instalação industrial, contendo grandes cargas não lineares, geralmente são violados os limites recomendados por norma de distorção harmônica. Diante dessa premissa, devem-se tomar medidas para assegurar o cumprimento desses limites e, desta forma, reduzir os efeitos indesejáveis dos harmônicos no sistema elétrico industrial, evitando assim a extensão dos problemas de qualidade de energia ao sistema de fornecimento externo.

Os meios de compensação da distorção harmônica por excelência são os filtros de harmônicos que visam essencialmente restringir a circulação das correntes harmônicas pela rede, a fim de evitar a distorção da tensão nas barras (Arrillaga & Watson, 2003).

Para o princípio de operação, os filtros harmônicos podem ser: passivos, ativos ou híbridos (quando se utiliza uma mistura dos dois primeiros). Apesar dos filtros ativos terem mostrado vantagens nos sistemas de baixa tensão, os filtros passivos são ainda os mais atraentes nos sistemas de média e alta tensão (Nassif & Xu, 2007); (Jakkapong, 2011).

Os filtros harmônicos passivos podem ser do tipo: série ou paralelo, sendo este último o mais utilizado, uma vez que apresenta a vantagem adicional, de também serem eficazes compensadores da potência reativa e podem funcionar simultaneamente nas funções de filtragem e compensação da potência reativa em sistemas elétricos industriais com a presença de cargas não lineares e de baixo fator de potência.

De forma geral, o filtro passivo paralelo apresentado na Figura 3.1 está composto por um capacitor de potência reativa $Q_{c_{nom}}$ e um circuito passivo formado por indutores, resistores e capacitores, cujo objetivo é formar um percurso de baixa impedância para os harmônicos que se deseja evitar a sua circulação pelo sistema elétrico.

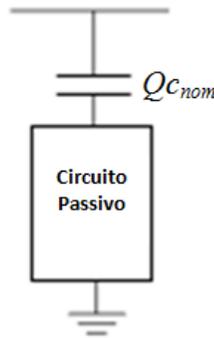


Figura 3.1. Filtro passivo paralelo

Este arranjo de filtro tem a função tanto de compensar a potência reativa na frequência fundamental, como diminuir a circulação dos harmônicos indesejáveis.

Em ambos os casos, os componentes são selecionados para que a impedância do filtro seja mínima, a frequência de sintonia (n) e com um fator de qualidade (Q) que garanta um bom desempenho do filtro.

Existem diversas tipologias de filtros passivos paralelos que podem ser classificados em filtros sintonizados e filtros amortecidos (Arrillaga & Watson, 2003); (Nassif, Xu & Freitas, 2009) e (Li Zeng, Liu, Luo & Zhang, 2012).

3.2 Filtros sintonizados

Nos filtros sintonizados ou filtros passa faixa como mostra a Figura 3.2, o circuito passivo é composto por um capacitor e uma indutância em série a uma resistência de baixo valor (Dugan *et. al*, 2004); (Arrillaga & Watson, 2003) e (Nicole, Mandache & Ileana-Diana Nicole, 2011).

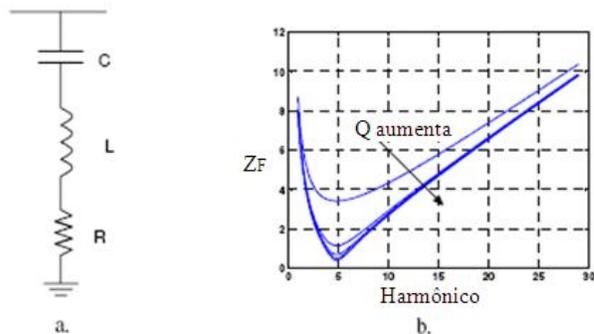


Fig. 3.2. Filtro sintonizado. a) Topologia, b) Impedância versus frequência.

Estes filtros são utilizados para eliminar harmônicos de baixa ordem com um alto fator de qualidade como mostra a relação (3.1):

$$Q = n \cdot X_l / R = X_c / (n \cdot R) \quad (3.1)$$

Onde X_l e X_c são respectivamente as reatâncias indutiva e capacitiva do filtro à frequência fundamental.

A banda passante ou largura de banda (BP) do filtro, apresentada na Figura 3.3, é definida como o conjunto de frequências limitadas por pontos em que a reatância total do filtro se iguala à resistência de forma tal que a impedância do filtro tenha o valor $\sqrt{2}R$ (Arrillaga & Watson, 2003).

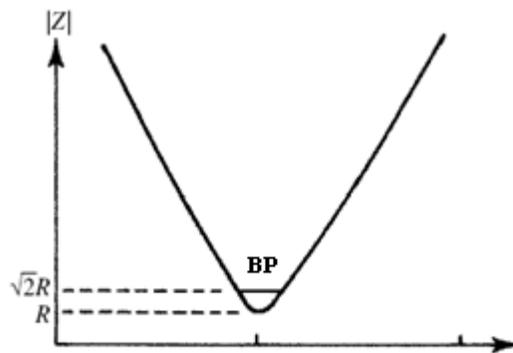


Figura 3.3: Banda Passante

Como visto na Figura 3.2 (b), quando o fator de qualidade (Q) aumenta, diminui a largura de banda, ou seja, o filtro é mais seletivo (Dugan *et. al*, 2004) e (Arrillaga & Watson, 2003).

A frequência na qual ocorre o mínimo de impedância (frequência de sintonia) corresponde à frequência de ressonância do filtro de acordo com a relação (3.2):

$$n = \sqrt{X_c / X_l} \quad (3.2)$$

A seleção de X_c e X_l para um capacitor C de potência reativa Q_{cnom} é muito simples como mostram as expressões (3.3) e (3.4):

$$X_c = V_n^2 / Q_{cnom} \quad (3.3)$$

$$X_l = X_c / n^2 \quad (3.4)$$

Uma vez determinada X_l e conhecido o fator de qualidade, a resistência é calculada pela relação (3.5):

$$R = n \cdot X_l / Q \quad (3.5)$$

A impedância deste filtro à frequência fundamental Z_l é dada pela expressão (3.6):

$$Z_l = R + j(X_l - X_c) \quad (3.6)$$

A potência reativa do filtro à frequência fundamental pode ser obtida de acordo com a relação (3.7):

$$Q_l = \text{imag} \cdot \left\{ V_n^2 / Z_l^* \right\} \quad (3.7)$$

No entanto, como o fator de qualidade é elevado (a resistência é muito pequena) a potência reativa gerada pelo filtro à frequência fundamental pode ser calculada pela relação (3.8):

$$Q_l \approx \frac{V_n^2}{X_c - X_l} = \frac{V_n^2}{X_c \cdot (1 - 1/n^2)} = Q_{c_{nom}} \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (3.8)$$

Portanto, quando se deseja projetar o filtro para atender um determinado valor Q_l potência reativa gerada, X_c é determinada como mostra a relação (3.9):

$$X_c = \frac{V_n^2}{Q_{c_{nom}}} \approx \frac{V_n^2}{Q_l} \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (3.9)$$

3.2.1 Variação dos parâmetros

Filtros sintonizados são os mais atingidos pelas variações nos parâmetros devido a sua estreita largura de faixa. Quando são produzidas as variações ΔL e ΔC na indutância e capacitância do filtro, a nova frequência de ressonância do mesmo n_{new} depende da frequência de sintonia nominal do filtro n_{nom} dada pela expressão (3.10) (IEEE STD 1531, 2003):

$$n_{new} = n_{nom} / \sqrt{(1 + \Delta L)(1 + \Delta C)} \quad (3.10)$$

O efeito das variações da capacitância e indutância sobre a característica da impedância versus frequência do filtro é idêntico como pode ser visto na Figura 3.4. Portanto, a ação combinada das variações pode provocar uma modificação significativa da frequência de ressonância do filtro.

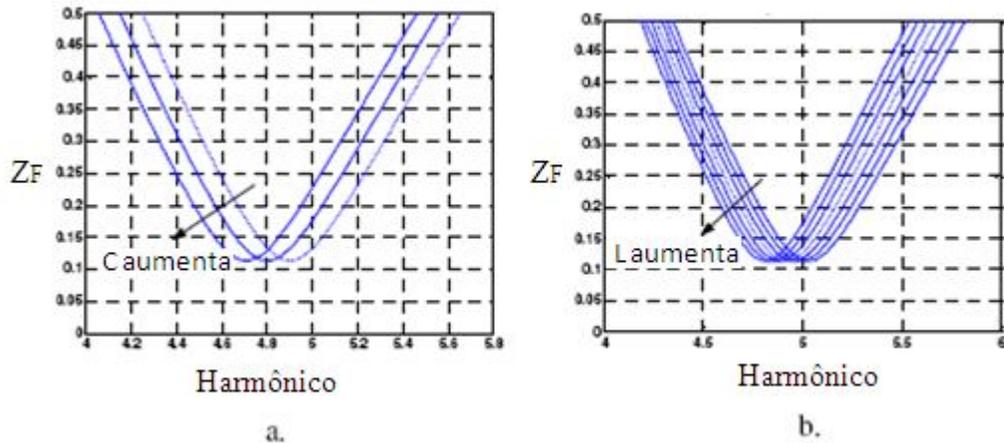


Figura 3.4: Efeito de variação dos parâmetros: (a) capacitância, (b) indutância.

As variações dos parâmetros L e C do filtro ocorrem a partir de várias situações tais como:

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

A norma IEEE Std 18 2002 estabeleceu tolerâncias de fabricação para os capacitores de 0% a 10% a uma temperatura de 25°C. No entanto, nos capacitores fabricados de capacitância baixa, esta norma pode ter tolerância de 0% a 15% (IEEE STD 1531, 2003). Além disso, a capacitância é reduzida em 0,4% a 0,8% para cada aumento de 10°C na temperatura.

Com respeito aos reatores, considera-se uma tolerância de $\pm 5\%$ para a indutância. Considerando todas as prováveis variações de indutância (ΔL) e capacitância (ΔC), a nova frequência de sintonia pode-se situar na faixa dada por (3.11) (Nassif & Xu, 2007):

$$0.93 \cdot n_{nom} \leq n_{new} \leq 1.026 \cdot n_{nom} \quad (3.11)$$

Em uma frequência inferior a sua frequência de sintonia, o filtro se comporta como um capacitor, podendo provocar ressonância com os elementos indutivos da rede (Nassif & Xu, 2007). Dessa maneira, para evitar que a frequência de sintonia do filtro supere a da frequência do harmônico h que se deseja eliminar, escolhe-se n_{nom} conforme relação (3.12):

$$n_{nom} \leq h/1.026 \quad (3.12)$$

Em outras palavras, os filtros sintonizados devem ser projetados não para a frequência de harmônico a eliminar h , mas sim para uma frequência menor de aproximadamente $0.95h$.

3.3 Filtros amortecidos (Passa - alta)

Os filtros amortecidos apresentados na Figura 3.5 são caracterizados por terem uma característica de impedância versus frequência mais suave, que permite a passagem das altas frequências e, portanto sua eliminação.

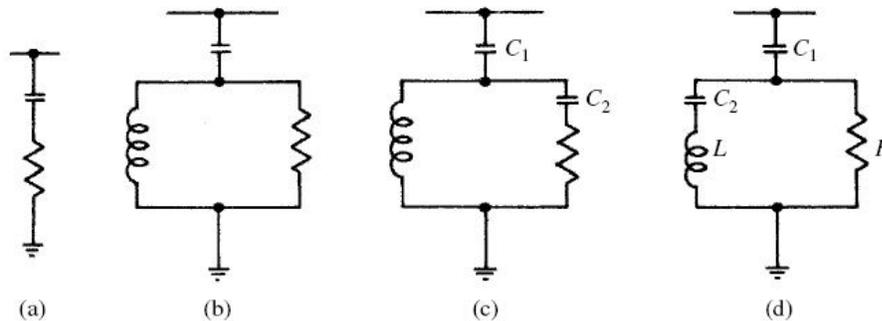


Figura 3.5: Filtros amortecidos. (a) 1ª ordem, (b) 2ª ordem, (c) 3ª ordem, (d) tipo C

O filtro de primeira ordem não é utilizado normalmente, já que requer um grande capacitor e tem perdas excessivas à frequência fundamental.

O filtro de segunda ordem apresenta o melhor desempenho como um filtro, mas tem maiores perdas na frequência fundamental que o de terceira ordem.

O filtro tipo C tem um desempenho intermediário entre os de segunda e terceira ordens. Sua principal vantagem é a considerável redução das perdas à frequência fundamental, já que C_2 e L são escolhidos para atingir a ressonância série a esta frequência. No entanto, este filtro é mais afetado por variações da frequência e seus parâmetros.

O fator de qualidade dos filtros amortecidos é definido como a relação (3.13):

$$Q = R / (n \cdot X_l) \quad (3.13)$$

Pode-se determinar a frequência n na qual ocorre o mínimo da impedância do filtro conforme as derivadas parciais descrita em (3.14) (Abril, 2012):

$$\frac{d}{dn} |Z(R, X_l, X_c, n)|^2 = 0 \quad (3.14)$$

A partir de condições (3.13) e (3.14) é não só conhecida a potência reativa Q_{cn} do capacitor, como também podem ser determinados todos os parâmetros dos vários tipos de filtros amortecidos.

3.3.1 Filtro de segunda ordem

O filtro amortecido mais utilizado na prática é o de segunda ordem como mostra a Figura 3.6 cujo comportamento depende do fator de qualidade utilizado em seu projeto. Um fator de qualidade alto implica uma banda passante mais seletiva, enquanto um fator de baixa qualidade reduz a impedância do filtro para altas frequências.

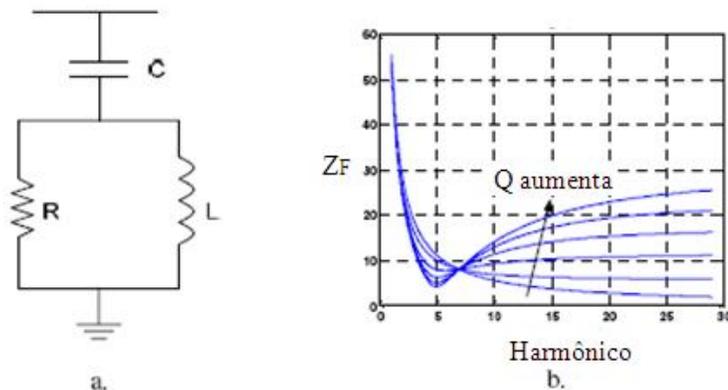


Figura 3.6: Filtro de segunda ordem: a) Topologia, b) Impedância versus frequência.

A impedância deste filtro para a frequência n pode ser obtida da relação (3.15):

$$Z = \frac{R(jX_l \cdot n)}{R + jX_l \cdot n} - jX_c / n \quad (3.15)$$

De forma que a condição de mínima impedância para este tipo de filtro é definida (Abril, 2012) por (3.16):

$$2 \left[\frac{(R^4 \cdot X_l^2 + 2 \cdot X_c \cdot R^2 \cdot X_l^3 - X_c^2 \cdot X_l^4) \cdot n^4 - 2 \cdot (X_c^2 \cdot R^2 \cdot X_l^2) \cdot n^2 - X_c^2 \cdot R^4}{(R^2 + n^2 \cdot X_l^2)^2 \cdot n^3} \right] = 0 \quad (3.16)$$

Substituindo X_l pela relação (3.17):

$$X_l = R/(n \cdot Q) \quad (3.17)$$

Obtém-se um polinômio de segunda ordem que relaciona R com os parâmetros conhecidos do filtro: X_c , Q e n conforme (3.18):

$$(Q^2 \cdot n^2) \cdot R^2 + (2 \cdot X_c \cdot Q \cdot n) \cdot R - (X_c^2 + 2 \cdot X_c^2 \cdot Q^2 + X_c^2 \cdot Q^4) = 0 \quad (3.18)$$

Os valores de resistência são determinados como a primeira raiz real positiva deste polinômio (Abril, 2012) como mostra (3.19):

$$R = X_c / (n \cdot Q) \left(\sqrt{(1 + Q^2)^2 + 1} - 1 \right) \quad (3.19)$$

Uma vez calculada R , X_l se obtém de (3.17) e desta forma são determinados todos os parâmetros do filtro.

Entretanto, se o projeto se realiza para que o filtro gere uma potência reativa Q_l , a frequência fundamental, pode-se executar um processo iterativo para determinar o valor

necessário de X_c , embora possa ser usada a expressão aproximada de acordo com (3.20) (Abril, 2012):

$$X_c \approx \frac{V_n^2}{Q_1} \frac{1}{1 - \left(\sqrt{(1+Q^2)^2 + 1} - 1 \right) / (n^2 \cdot Q^2 + 1)} \quad (3.20)$$

No que diz respeito à variação dos parâmetros L e C , este tipo de filtro apresenta comportamento muito estável, como pode ser visto na Figura 3.7.

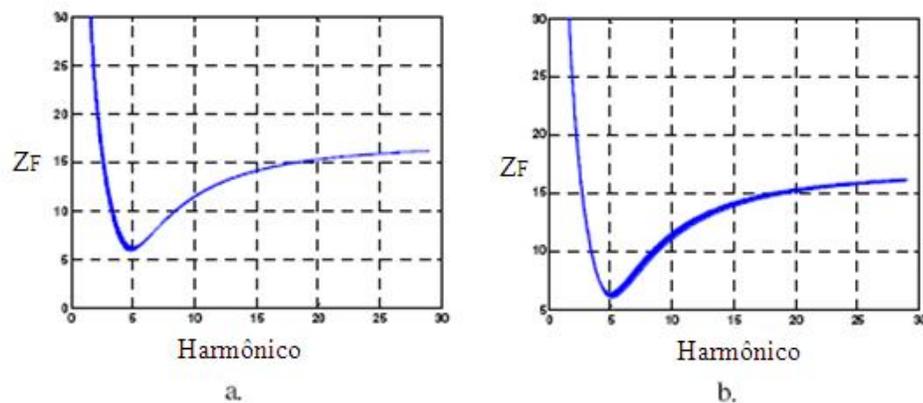


Figura 3.7: Efeito de variação dos parâmetros: (a) capacitância, (b) indutância.

3.3.2 Filtro de terceira ordem

O filtro de terceira ordem incorpora um novo capacitor C_2 no circuito (Figura 3.8).

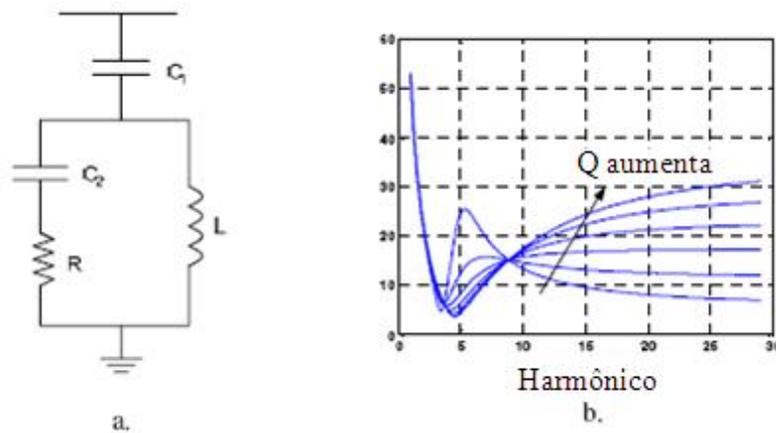


Figura 3.8: Filtro de terceira ordem. a) Topologia, b) Impedância \times frequência.

A impedância deste filtro para a frequência n é determinada em (3.21):

$$Z = \frac{(R - jX_{C_2}/n)(jX_L \cdot n)}{R + j(X_L \cdot n - X_{C_2} \cdot n)} - jX_{C_1}/n \quad (3.21)$$

Como o filtro de terceira ordem tem dois capacitores, há que pré-estabelecer uma relação entre C_1 e C_2 , para poder resolver o problema com as condições estabelecidas. Normalmente, têm-se dois capacitores iguais conforme a relação (3.22) (Arrillaga & Watson, 2003):

$$X_c = X_{C_1} = X_{C_2} \quad (3.22)$$

Seguindo o procedimento descrito para o filtro de segunda ordem, obtêm-se o polinômio que estabelece a relação correta entre os parâmetros do filtro (Abril, 2012), de acordo com a expressão (3.23).

$$\begin{aligned} (n^6 Q^2)R^6 - (n^4 X_c^2 (Q^4 + 4))R^4 + (4n^3 X_c^3 Q(Q^2 + 2))R^3 - (n^2 X_c^4 Q^2 (2Q^2 + 7))R^2 + \dots \\ (4n X_c^5 Q^3)R - (2X_c^6 Q^4) = 0 \end{aligned} \quad (3.23)$$

Não existe solução analítica para as raízes deste polinômio, pois a solução é numérica, determinando R como a primeira raiz real positiva. Como não há uma solução analítica para R , não se pode estabelecer uma expressão analítica para X_c quando se projeta para satisfazer uma Q_l pré-definida.

Como mostra a Figura 3.9 o filtro não é muito afetado pela variação de seus parâmetros.

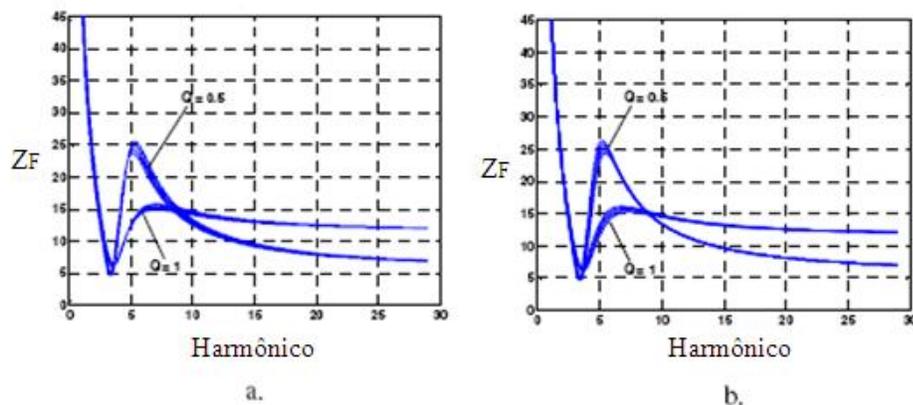


Figura 3.9: Efeito de variação dos parâmetros: (a) capacitância, (b) indutância.

3.3.3 Filtro tipo C

O projeto deste filtro apresentado na Figura 3.10 baseia-se em que X_L é igual a X_{C_2} e, portanto, produz uma ressonância em série entre os mesmos à frequência fundamental de forma que a resistência é curto-circuitada a esta frequência e o filtro operam como um capacitor.

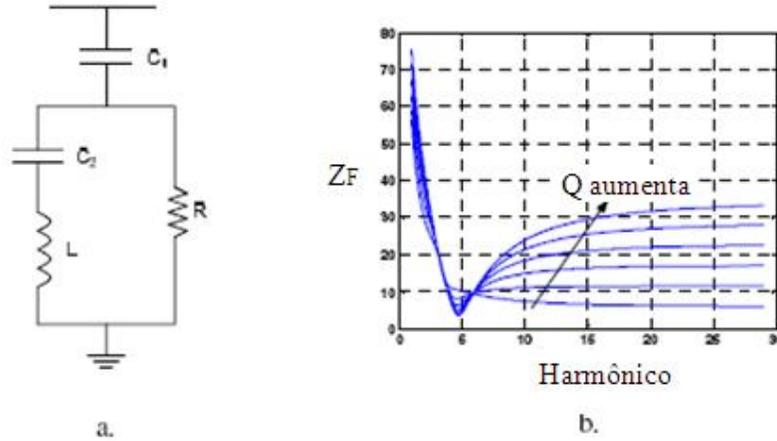


Figura 3.10: Filtro tipo C. a) Topologia, b) Impedância versus frequência.

A impedância do filtro tipo C para a frequência n em (3.24) é:

$$Z = \frac{jR(X_L \cdot n - X_{C_2}/n)}{R + j(X_L \cdot n - X_{C_2} \cdot n)} - jX_{C_1}/n \quad (3.24)$$

Seguindo o procedimento descrito, obtém-se a resistência a partir de (Abril, 2012) conforme (3.25):

$$R = \frac{X_{C_1}}{n^3(n^4 - 1)Q} \left((n^2(Q^2 + 2) - n^4 - 1) + \dots \right) \quad (3.25)$$

$$+ \sqrt{n^{12}(Q^4 + 2Q^2 + 2) - 2n^{10}(3Q^2 + 4) + n^8(4Q^2 + 11) + 2n^6(Q^2 - 2) - 2n^4(Q^2 + 2) + 4n^2 - 1}$$

Como se comprova na Figura 3.11, este filtro é muito afetado por variações dos parâmetros.

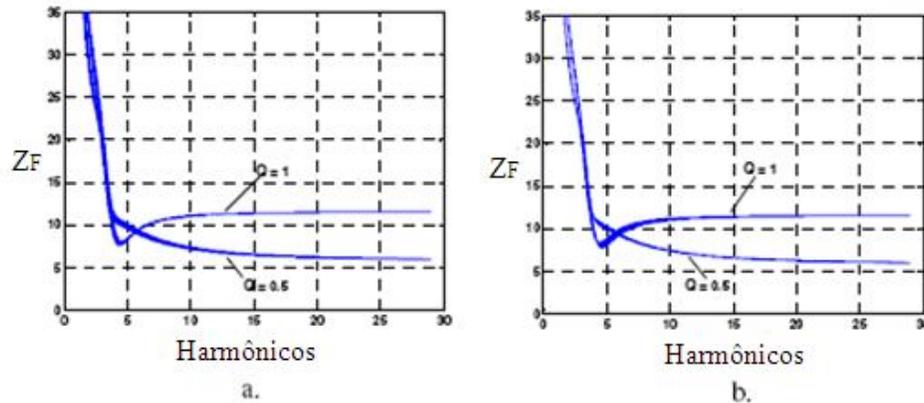


Figura 3.11: Efeito de variação dos parâmetros: (a) capacitância, (b) indutância.

3.4 Saturação dos componentes

A norma IEEE Std 18-2002 (IEEE Std 18-2002, 2003) estabelece que os capacitores de potência dos filtros harmônicos devem 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* (V_{cnom}).
- 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* (I_{cnom}).
- 4) A potência reativa gerada pelo capacitor não supere a 135% da sua potência reativa nominal (Q_{cnom}).

Desta maneira, se h é o conjunto de harmônicos a que o capacitor está submetido, poder-se estabelecer as seguintes relações (3.26), (3.27), (3.28) e (3.29):

$$\sqrt{\sum_{h \in H} V_h^2} \leq 1.1 \cdot V_{C_{nom}} \quad (3.26)$$

Onde V_h representa a tensão do harmônico h aplicado ao capacitor.

$$V_{pico} \leq 1.2 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{C_{nom}} \quad (3.27)$$

Onde V_{pico} representa a tensão pico aplicada ao capacitor.

$$\sqrt{\sum_{h \in H} I_h^2} \leq 1.35 \cdot I_{C_{nom}} \quad (3.28)$$

Onde I_h representa a corrente do harmônico h que circula pelo capacitor.

$$\sum_{h \in H} Q_{C_h} \leq 1.35 \cdot Q_{C_{nom}} \quad (3.29)$$

Onde Q_{C_h} é a potência reativa do harmônico h gerada pelo capacitor.

Na saturação dos reatores e resistores, apesar de não haver uma norma específica a respeito (IEEE Std 1531, 2003), considera-se que os valores de tensão *rms*, corrente *rms* e a potência nominal destes elementos, não podem ultrapassar nenhuma condição de operação estável do filtro.

3.5 Custos dos filtros

O custo de investimento de um filtro é a soma dos custos de seus elementos componentes (Kawann & Emanuel, 1996):

- 1) Capacitores, reatores e resistores;
- 2) Proteção (fusíveis, interruptores, etc.), e;
- 3) Carcaça (Chassis, etc.)

O custo de capacitores como mostra a Figura 3.12, reatores na Figura 3.13 e resistores podem ser considerados como uma função linear da potência do elemento para uma tensão nominal dada (Kawann & Emanuel, 1996):

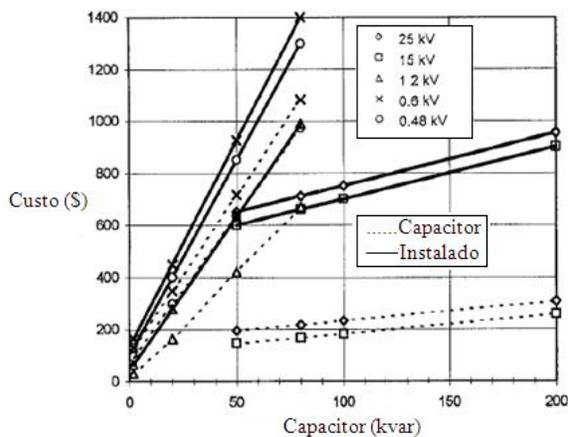


Figura 3.12. Custo de capacitores

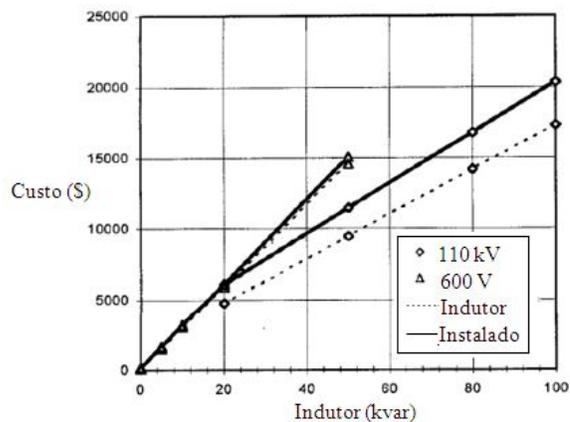


Figura 3.13. Custo de reatores

Com respeito ao custo dos demais elementos, este pode ser considerado como 1% do custo total do filtro.

CAPÍTULO IV

ANÁLISES DE HARMÔNICOS

4.1 Introdução

O único modo efetivo de estudar a geração e propagação de harmônicos em um sistema elétrico de potência, é a simulação do sistema a partir do modelo de comportamento dos seus componentes a frequências harmônicas (Task Force of the Harmonics Working Group, 2000).

Comumente, os estudos de penetração ou de propagação harmônica baseiam-se em modelar o sistema de potência, como uma rede linear desacoplada para diferentes harmônicos gerados por um conjunto de cargas não lineares.

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

Tanto nas redes elétricas de instalações industriais, quanto nas instalações comerciais ou de serviços, aparecem desequilíbrios causados no sistema, provocados pelo uso de:

- a) Bancos de transformadores assimétricos, compostos de transformadores de capacidade diferentes e inclusive bancos abertos, e que utilizam conexões assimétricas (delta a quatro fios, etc.);
- b) Alimentadores de quatro, três e dois fios, trifásicos e monofásicos, e;
- c) Cargas monofásicas conectadas entre fases ou entre fase e neutro.

A Análise precisa da propagação de harmônicos no sistema é obtida por meio de um modelo trifásico da rede, pois embora o sistema se comporte praticamente equilibrado à frequência fundamental, nas frequências harmônicas pode exibir um comportamento altamente assimétrico (Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, 1996).

Os modelos do sistema em coordenadas de fase podem ser utilizados para analisar o comportamento das redes (monofásicas e trifásicas) à frequência fundamental, tal como nas

outras frequências, e podem ser utilizados para a análise harmônica em tais redes desbalanceadas (Arrillaga & Arnold, 1990); (Sainz, Caro & Pedra, 2004 e 2005) e (Leite *et. al*, 2012).

4.2 Fontes de harmônicos

Não há um modelo geral para cargas não lineares ou fontes de harmônicos do sistema, uma vez que cada fonte tem um modelo dependente do tipo de não linearidade apresentada. Estas cargas são representadas correntemente mediante dois tipos de modelos: fonte de corrente constante ou fonte de corrente dependente.

O modelo mais utilizado é o de fonte de corrente constante, o que é baseado na utilização do espectro harmônico característico da carga que vai ser modelada.

O método parte do pressuposto de que a forma de onda da corrente demandada pela carga é independente da tensão aplicada ou do seu conteúdo harmônico, pelo qual as relações entre os harmônicos superiores e a frequência fundamental são mantidas constantes.

Em um sistema equilibrado, a corrente harmônica de ordem h e o seu respectivo ângulo podem ser obtidos, conhecendo-se o espectro harmônico característico da carga, a corrente consumida pela mesma à frequência fundamental I_1 mostradas nas relações (4.1) e (4.2) (Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, 1996):

$$I_h = I_1 \left(I_{h\text{-espectro}} / I_{1\text{-espectro}} \right) \quad (4.1)$$

$$\phi_h = \phi_{h\text{-espectro}} + h(\phi_1 - \phi_{1\text{-espectro}}) \quad (4.2)$$

Onde I_h é a corrente harmônica h e I_1 é a corrente a frequência fundamental, ϕ_h é o ângulo da corrente harmônica h e ϕ_1 é o ângulo da corrente a frequência fundamental. Além disso $I_{h\text{-espectro}}$, $I_{1\text{-espectro}}$, $\phi_{h\text{-espectro}}$ e $\phi_{1\text{-espectro}}$ são as magnitudes correspondentes as correntes e os ângulos desse espectro de harmônico utilizado para representar a fonte.

No entanto, para modelar em coordenadas de fase uma carga não linear, deve-se estabelecer os espectros harmônicos para as correntes das N fases consideradas.

A potência aparente de uma carga não-linear (S_I) na frequência fundamental é a soma das potências de cada fase de acordo (4.3):

$$S_1 = \sum_{p=1}^N V_{1(p)} \cdot (I_{1(p)})^* \quad (4.3)$$

Onde $V_{1(p)}$ e $I_{1(p)}$ são a tensão e corrente da frequência fundamental da fase p .

Além disso, como deve ser respeitada as relações em módulo e ângulo entre as correntes de fase do espectro utilizado para representar a carga, presume-se que existe uma relação linear entre a corrente a calcular e o padrão que pode ser expressa por (4.4):

$$I_{h(p)} = \alpha \cdot I_{h(p)-espectro} \quad (4.4)$$

Para determinar o parâmetro complexo α , substitui-se (4.4) em (4.3) e obtêm-se:

$$S_1 = \sum_{p=1}^m V_{1(p)} \cdot (I_{1(p)-espectro})^* \cdot \alpha^* \quad (4.5)$$

Onde se determina α como mostra a relação (4.6):

$$\alpha^* = S_1 / \sum_{p=1}^N V_{1(p)} \cdot (I_{1(p)-espectro})^* \quad (4.6)$$

Em seguida, são obtidas as correntes da fundamental e de todos os harmônicos em cada fase p pelas relações (4.7) e (4.8):

$$|I_{h(p)}| = |\alpha| \cdot |I_{h(p)-espectro}| \quad (4.7)$$

$$\phi_{h(p)} = \phi_{h(p)-espectro} + h \cdot \phi_\alpha \quad (4.8)$$

Onde ϕ_α representa o ângulo da constante complexa α .

A principal desvantagem de modelar estas cargas, como fontes de corrente constante, reside na utilização de espectros típicos que não podem se adaptar às condições reais do sistema de baixa tensão como: carga parcial dos equipamentos geradores de harmônicos, variações da magnitude, excessiva distorção ou desequilíbrio das tensões de alimentação. Contudo, se são

conhecidos os espectros característicos para as diferentes condições de operação de tais cargas, os possíveis erros podem ser minimizados (Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, 1996).

4.3 Modelos matemáticos dos elementos do sistema

Geralmente, os componentes do sistema de potência como linhas, transformadores, máquinas rotativas, etc. são considerados lineares e são representados por circuitos equivalentes passivos que, para a aplicação desenvolvida nesta tese, são formulados em coordenadas de fase.

Em essência, a modelagem em coordenadas de fase é capaz de determinar a tensão em todos os pontos ou nós de interesse com respeito a um nó de referência, que em geral é o terra, mas no caso de um sistema não aterrado ou assimétrico como o sistema delta de quatro fios, é um nó fictício de referência.

Para implementar a análise de harmônicos em coordenadas de fase, tem sido considerada uma modelagem capaz de representar a rede com um nível de detalhe significativo conforme a Figura 4.1 (Abril & Leite, 2012); (Leite *et. al*, 2012).

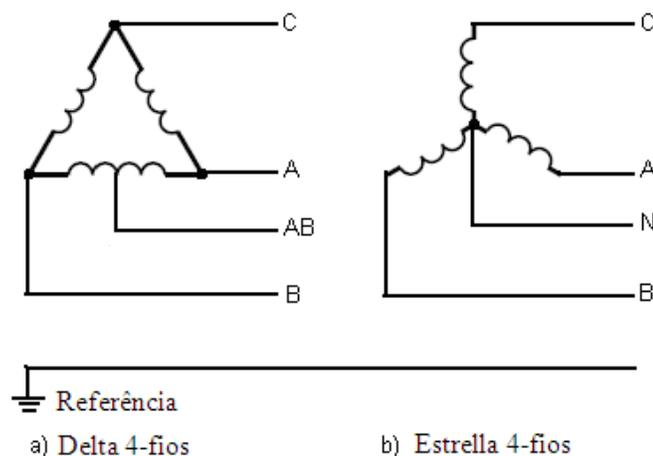


Figura 4.1: Tensões de fase-fase segundo a modelagem em coordenadas de fase para esquemas delta ou estrela de quatro fios.

Nesta representação, cada fase (A, B, C), tap central entre duas fases (AB, BC, CA) ou neutro da conexão estrela são representados por nós independentes que aparecerão como eixos da matriz de admitância resultante da representação. Após a montagem da matriz admitância

contendo todos os nós, são eliminados alguns nós como os neutros flutuante que são criados em conexão estrela não aterrada.

4.3.1 Transformadores

O modelo de transformadores trifásicos e dos bancos de transformadores monofásicos é uma das partes mais complicadas do modelo de rede, pela diversidade de conexões e configurações possíveis (Irving, 2003).

No entanto, este problema pode ser simplificado utilizando o procedimento de agregação descrito para construir o modelo de um banco trifásico de transformadores como mostra a Figura 4.2, formado por transformadores monofásicos (Chen & Yang, 1998, 2000 e 2001).

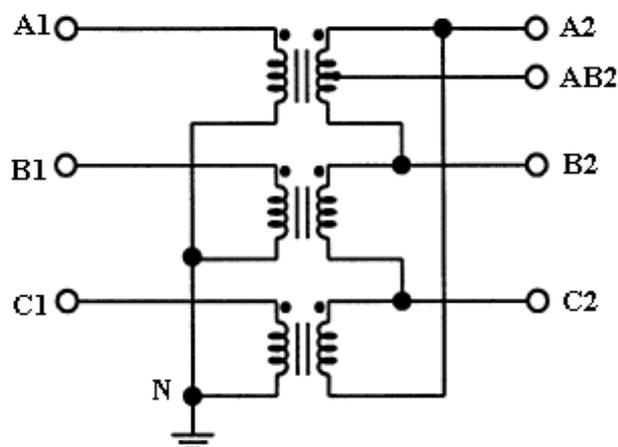


Figura 4.2: Banco Yg-D de transformadores monofásicos

Em geral, este procedimento consiste em determinar a matriz de admitância do banco de transformadores que é formada pela sobreposição das matrizes correspondentes das subredes como são apresentadas na Figura 4.3 formadas pelos transformadores que constituem o banco.

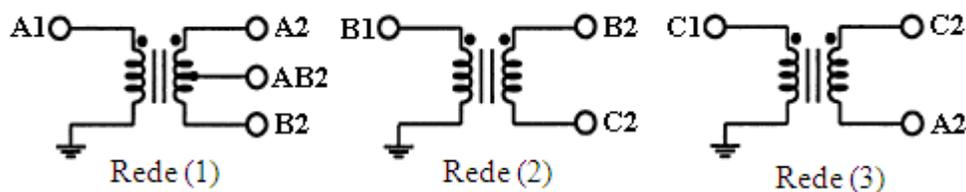


Figura 4.3: Sub-redes que compõem o banco de transformadores

Um transformador trifásico pode ser representado como um banco de três transformadores monofásicos iguais (se desconsiderado os efeitos devido a certos tipos de núcleo), de modo que este método pode ser utilizado para os bancos de dois ou três transformadores monofásicos e assim como para transformadores trifásicos.

Uma vez obtida a matriz admitância do banco, os nós que representam o neutro dos enrolamentos em conexão Y não aterrada, podem ser eliminados por álgebra de matrizes, dado que a corrente é igual a zero pelo neutro, neste caso.

Desta forma, para modelar os bancos de transformadores ou os transformadores trifásicos, precisa-se dos modelos de transformador monofásico com quatro e cinco terminais como mostra as Figuras 4.4 e 4.5.

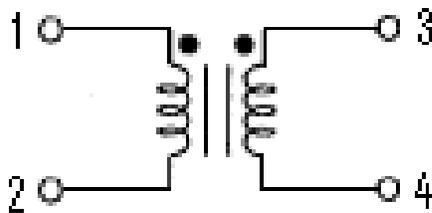


Figura 4.4: Transformador de quatro terminais.

No transformador de quatro terminais, a relação de impedância entre ambos enrolamentos é irrelevante. Se h é a ordem do harmônico, a impedância série do transformador a essa frequência é como mostrado em (4.9):

$$Z = 1/y = Z_p + Z_s = (R_p + R_s) + jh(X_p + X_s) = R + jhX \quad (4.9)$$

Onde Z_p e Z_s são as impedâncias do enrolamento primário e secundário respectivamente.

No cálculo de Z , o efeito *skin* pode ser considerado por meio da adição de uma resistência de valor $80X$ em paralelo com a reatância (Arrillaga & Watson, 2003); (Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, 1996).

Sendo y a admitância série do transformador ao harmônico h , e α e β representam as posições dos taps do primário e secundário, a matriz admitância do transformador monofásico

com quatro terminais é dada conforme (4.10):

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & -y_{11} & -y_{12} & y_{12} \\ -y_{11} & y_{11} & y_{12} & -y_{12} \\ -y_{12} & y_{12} & y_{22} & -y_{22} \\ y_{12} & -y_{12} & -y_{22} & y_{22} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Onde:

$$y_{11} = y/\alpha^2, \quad y_{12} = y/\alpha\beta, \quad y_{22} = y/\beta^2 \quad (4.11)$$

Deve-se esclarecer que no caso de a fase primária ou secundária do enrolamento estrela for conectada a fase (conexão delta), o tap correspondente, α ou β é multiplicado por $\sqrt{3}$.

Os nós 1 e 3 são sempre uma fase, enquanto que os nós 2 e 4 podem ser uma segunda fase (conexão delta) ou um neutro (conexão Y). Caso o neutro esteja conectado diretamente ao nó de referência, elimina-se a linha e a coluna correspondentes da matriz admitância.

Um transformador com derivação central no secundário tem cinco terminais:

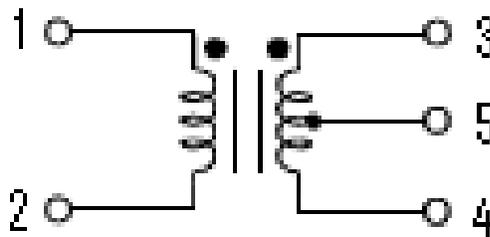


Figura 4.5. Transformador de cinco terminais.

Neste caso, o nó 4 sempre é uma segunda fase e o 5 é o neutro do secundário de um sistema delta a quatro fios. No entanto, o nó 5 nunca poderá ser eliminado, pois a modelagem realizada não está conectada ao nó de referência, por isso, deve ser tratado como uma fase a mais.

A impedância do enrolamento inteiro “*full-winding*” deste transformador corresponde a impedância vista a partir do enrolamento do primário com os enrolamentos do secundário curto-

circuitados como mostra a relação (4.12):

$$Z = 1/y = Z_p + Z_s/2 = (R_p + R_s/2) + jh(X_p + X_s/2) = R + jhX \quad (4.12)$$

A matriz admitância deste tipo de transformador é calculada (Leite *et. al*, 2012) como segue em (4.13):

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & -y_{11} & -y_{12} & y_{12} & 0 \\ -y_{11} & y_{11} & y_{12} & -y_{12} & 0 \\ y_{12} & y_{12} & 2(m+1)y_{22} & 2my_{22} & -2(2m+1)y_{22} \\ -y_{12} & -y_{12} & 2my_{22} & 2(m+1)y_{22} & -2(2m+1)y_{22} \\ 0 & 0 & -2(2m+1)y_{22} & -2(2m+1)y_{22} & 4(2m+1)y_{22} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Onde m é a relação entre a impedância do primário e do secundário do transformador de acordo com (4.14).

$$m = Z_p / Z_s \quad (4.14)$$

Para determinar o valor apropriado de m , deve-se ter os valores de impedância do enrolamento do transformador Z e a impedância do enrolamento médio “*half-winding*” Z' . A impedância do enrolamento completo é conhecida pela placa do transformador, mas a impedância do enrolamento médio deve-se medir curto-circuitando só uma das metades do secundário ou por meio das expressões da Tabela 4.1 (Short, 2004); (Moorthy & Hoadley, 2002).

Tabela 4.1: Impedância da metade do enrolamento

Tipo de enrolamentos	Z'
Entrelaçados	$1.50R + j1.2X$
Não entrelaçados	$1.75R + j2.5X$

Uma vez obtida Z' , a relação m pode ser calculada como mostra (4.15):

$$m = (2Z - Z') / (2Z' - 2Z) \quad (4.15)$$

Finalmente, vale destacar que, no modelo em coordenadas de fase, as defasagens que ocorrem entre primário e secundário, devido as conexões dos transformadores, são determinadas

de forma natural e não têm que ser especificadas, portanto é necessário considerar os modelos em componentes de sequência.

4.3.2 Alimentadores

A representação dos alimentadores se realiza pelo circuito π para linhas curtas como mostra a Figura 4.6, utilizando a formulação habitualmente usada em modelos deste tipo (Arrillaga & Watson, 2001 e 2003); (Arrillaga & Arnold, 1990).

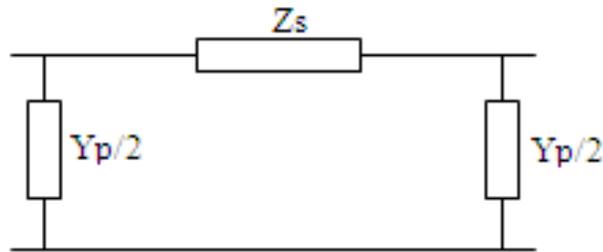


Figura 4.6: Circuito π da linha.

A auto impedância Z_{aa} de um condutor com retorno por terra e a impedância mútua Z_{ab} entre os condutores a e b são calculadas de acordo com as relações (4.16) e (4.17) (Short, 2004):

$$Z_{aa} = R_a + R_e + jh \cdot 0.17361 \log \frac{D_e}{GMR_a} (\Omega / km) \quad (4.16)$$

$$Z_{ab} = R_e + jh \cdot 0.17361 \log \frac{D_e}{GMD_{ab}} (\Omega / km) \quad (4.17)$$

R_e e D_e são a resistência e o diâmetro do condutor de Carson, ambos dependentes da frequência, enquanto que R_a e GMR_a são as resistências e o raio médio geométrico do condutor a . GMD_{ab} é a distância média geométrica entre os condutores a e b . Existem expressões para considerar o crescimento de R_a por efeito *skin* (Arrillaga & Watson, 2003); (Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, 1996).

Calculadas as impedâncias série dos condutores para a frequência desejada, forma-se a matriz de impedâncias da linha que depende do número de condutores (fases) considerados.

Por exemplo, uma linha trifásica com neutro seria representada por (4.18):

$$Z_S = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Se o condutor neutro conecta nós que foram eliminados, a queda de tensão através do referido condutor é adicionada à fase para obter as tensões em relação ao neutro. Isto é feito eliminando a linha e a coluna correspondente, através da utilização de álgebra de matrizes.

No que se refere a parte imaginária da admitância capacitiva, utilizam-se os valores tabelados para diferentes tipos de cabos em função de sua tensão e bitola, que são especificados (Westinghouse Electric Corporation, 1964).

Seguindo este procedimento, consegue-se uma representação da matriz de admitância do alimentador, em coordenadas de fase descrita por (4.19):

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}Y_p + Z_s^{-1} & -Z_s^{-1} \\ -Z_s^{-1} & \frac{1}{2}Y_p + Z_s^{-1} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Onde Y_p e Z_s , são submatrizes que representam a parte imaginária da admitância capacitiva e a impedância série da linha.

4.3.3 Máquinas rotativas

Nas máquinas síncronas e de indução, o campo magnético rotativo criado pelos harmônicos do estator gira a uma velocidade significativamente superior do que a do rotor, o que aproxima a impedância à frequências harmônicas, da impedância de sequência negativa da máquina (Arrillaga & Watson, 2003); (Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, 1996).

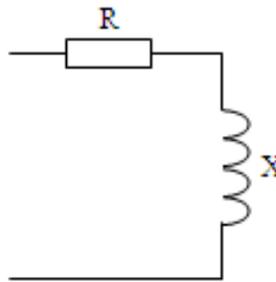


Figura 4.7: Circuito da máquina síncrona

No caso das máquinas síncronas como é representada na Figura 4.7, utiliza-se a reatância de sequência negativa ou a média das reatâncias subtransitórias dos eixos direto e quadratura calculadas para a frequência desejada de acordo com a relação (4.20).

$$Z = 1/y = R\sqrt{h} + jhX_2 \quad (4.20)$$

As máquinas de indução são representadas comumente pelo seu circuito equivalente da Figura 4.8, avaliada para o escorregamento considerado cujos parâmetros atualizam a frequência desejada.

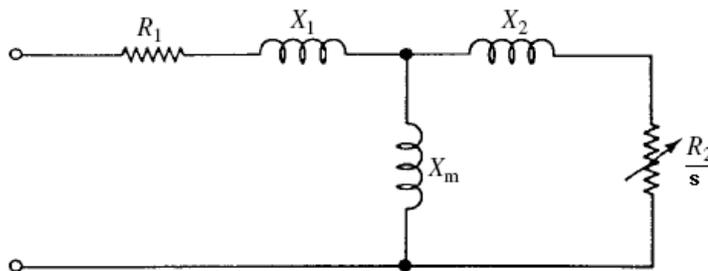


Figura 4.8: Circuito do motor de indução

O escorregamento correspondente ao harmônico h é calculado de acordo com a expressão (Dugan *et. al*, 2004), conforme (4.21):

$$s = (\pm h \cdot N_s - N_r) / (\pm h \cdot N_s) \quad (4.21)$$

Onde N_s e N_r são respectivamente a velocidade síncrona e a do rotor da máquina.

Em ambos os casos, a dependência da resistência com a frequência pode ser significativa devido ao efeito “*skin*” e o aumento das perdas por correntes parasitas (Arrillaga & Watson, 2003); (Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, 1996).

Uma vez que se dispõe da admitância série, a matriz de admitâncias de uma máquina em conexão delta é como mostra em (4.22):

$$Y = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2y & -y & -y \\ -y & 2y & -y \\ -y & -y & 2y \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

4.3.4 Cargas passivas

As cargas passivas lineares têm um efeito significativo sobre a resposta de frequência do sistema, principalmente na vizinhança das condições de ressonância.

Os modelos geralmente mais utilizados na literatura para estes tipos de cargas são o modelo paralelo como mostra na Figura 4.9 e o modelo série mostrada na Figura 4.10 (Arrillaga & Watson, 2003); (Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, 1996).

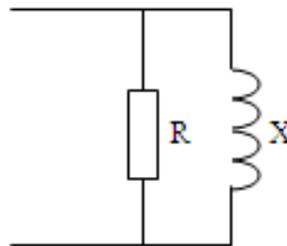


Figura 4.9: Modelo paralelo

O modelo de carga em paralelo representa a carga por uma resistência e reatância em paralelo. Este modelo fica amortecido pela presença da resistência em paralelo de modo que sua utilização conduza a resultados mais otimistas como mostra as relações (4.23) e (4.24).

$$R = \frac{(V_1^2 / P_1)}{0.1h + 0.9} \quad (4.23)$$

$$X = \frac{(V_1^2 / Q_1)h}{0.1h + 0.9} \quad (4.24)$$

Onde V_1 é a tensão à frequência fundamental aplicada à carga e P_1 , Q_1 são as potências ativas e reativas à frequência fundamental.

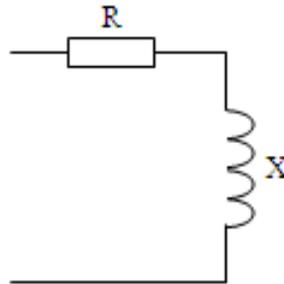


Figura 4.10. Modelo série

O modelo série utiliza uma impedância série para modelar a carga. Este é o modelo menos amortecido e, portanto, conduz a resultados mais pessimistas desde o ponto de vista de nível de distorção na rede, como mostra a impedância (4.25).

$$Z = \frac{V_1^2}{P_1^2 + Q_1^2} (P_1 \sqrt{h} + jQ_1 h) \quad (4.25)$$

Para a aplicação desenvolvida, todas as cargas passivas são decompostas em um conjunto de cargas monofásicas conectadas entre um par de nós, de modo que calculada a admitância da carga, atualizada para o harmônico h , a matriz de admitância da mesma é como mostra (4.26):

$$Y = \begin{bmatrix} y & -y \\ -y & y \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

4.3.5 Outros elementos

Outros elementos passivos, tais como bancos de capacitores, filtros de harmônicos, podem ser representados por arranjos de impedâncias entre fase e neutro ou fase e fase, o que dá possibilidade de estudar o efeito de assimetrias nestes elementos.

4.4 Varredura de frequência

A varredura de frequência é a técnica mais simples e comumente utilizada para a análise harmônicas que apresenta requisitos mínimos de dados. Em essência, esta técnica determina a resposta em frequência de um nó particular, como ilustrado na Figura 4.11 para um só nó com ligação delta a quatro fios. Este tipo de estudo é a ferramenta mais efetiva para detectar ressonâncias no sistema e tem sido amplamente utilizada para o projeto de filtros.

A Figura 4.11 mostra a varredura de frequência em uma barra de um sistema delta de quatro fios. Tipicamente, injeta-se uma corrente de I_{pu} de uma frequência dada no nó de interesse e calcula-se a tensão que aparece nesse nó. Este cálculo é repetido para avaliar as frequências em estudo, fazendo-se a varredura para todas as frequências de interesse.

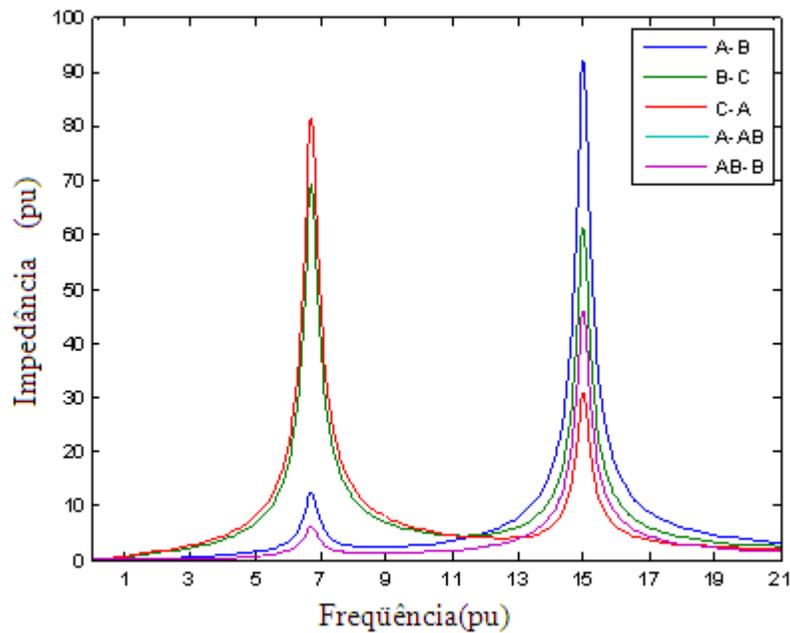


Figura 4.11: Varredura de frequência em uma barra de um sistema delta de quatro fios.

O processo baseia-se na expressão matricial como mostra (4.27):

$$V_h = Z_h \cdot I_h \quad (4.27)$$

Onde V_h , Z_h e I_h , são os vetores de tensões, a matriz de impedância e o vetor de injeções de corrente correspondente ao harmônico h .

Para a análise, desejando-se avaliar a resposta em frequência no nó específico k , o vetor de injeção de corrente terá todos os elementos nulos, menos aquele da posição k que terá um valor unitário (1 pu).

$$V_h = Z_h \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{h(1,k)} \\ \vdots \\ Z_{h(k,k)} \\ \vdots \\ Z_{h(n,k)} \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

O elemento de $V_{h(k)}$ é a tensão do harmônico h que se produz no nó k quando se injeta uma corrente unitária dessa frequência nesse nó. Em outras palavras, isto corresponde à impedância de Thevenin equivalente do nó k , $Z_{h(k,k)}$.

Cada elemento $V_{h(m)}$ para $m \neq k$ representa a tensão do harmônico h que aparece no nó m por uma injeção no nó k . Isto é, ele corresponde a impedância de transferência $Z_{h(m,k)}$.

Concluído o procedimento, são obtidas as características da impedância equivalente versus frequência e das impedâncias de transferências versus frequência.

A matriz de impedâncias da rede, para cada frequência, é determinada como o inverso de uma matriz de admitância Y_h que se constrói a partir dos modelos estabelecidos para os diferentes elementos do sistema elétrico como descrito na seção 4.3.

Utilizados os modelos para a sequência positiva, negativa e zero, pode-se obter as características de *impedância versus frequência* para injeções das diferentes sequências, o que permite aumentar as possibilidades do estudo e sua aplicação a sistemas desequilibrados.

Contudo, alguns tipos de redes elétricas de distribuição, sistemas elétricos industriais, instalações comerciais e/ou de serviço são tão desequilibrados que neste tipo de rede pode-se alcançar de forma mais eficaz uma modelagem mais efetiva, utilizando modelos em coordenadas de fase em contraposição a dos tradicionais modelos em componentes de sequência.

Uma injeção monofásica entre os nós k e m (retorno) é representada por uma corrente de +1pu no nó k e de -1pu no nó m , obtendo-se os seguintes resultados conforme mostra (4.29).

$$V_h = Z_h \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{h(1,k)} \\ \vdots \\ Z_{h(k,k)} \\ \vdots \\ Z_{h(n,k)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{h(1,m)} \\ \vdots \\ Z_{h(k,m)} \\ \vdots \\ Z_{h(n,m)} \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Por outro lado, uma injeção trifásica de sequência positiva nos nós k , m e t são calculados por:.

$$V_h = Z_h \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j2\pi/3} \\ e^{+j2\pi/3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{h(1,k)} \\ \vdots \\ Z_{h(k,k)} \\ \vdots \\ Z_{h(n,k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{h(1,m)} \\ \vdots \\ Z_{h(k,m)} \\ \vdots \\ Z_{h(n,m)} \end{bmatrix} e^{-j2\pi/3} + \begin{bmatrix} Z_{h(1,t)} \\ \vdots \\ Z_{h(k,t)} \\ \vdots \\ Z_{h(n,t)} \end{bmatrix} e^{+j2\pi/3} \quad (4.30)$$

Como se vê, qualquer tipo de injeção monofásica, bifásica ou trifásica pode ser representada neste tipo de modelagem de rede, o que dá uma grande versatilidade para a varredura de frequência.

Uma vez obtidas as tensões de fase, no que diz respeito ao nó de referência, podem ser determinadas as tensões de linha pela diferença entre as tensões de fase calculadas.

4.5 Fluxos de harmônicos

Se a varredura de frequência examina o comportamento da rede ante a uma injeção de corrente de frequência variável, o fluxo de harmônicos determina a propagação pela rede dos harmônicos injetados por múltiplas cargas não lineares ligados a mesma como mostra a Figura 4.12.

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

O método representa as injeções de correntes harmônicas por fontes de corrente constantes, calculadas a partir dos resultados de um fluxo de potência à frequência fundamental, que é feito previamente. O cálculo destas correntes é realizado a partir dos espectros de padrões

conhecidos para os diferentes tipos de cargas não lineares que se encontram na rede, conforme apresentado na seção 4.2, ou mesmo a partir da realização de uma campanha de medição simultânea nas cargas não lineares.

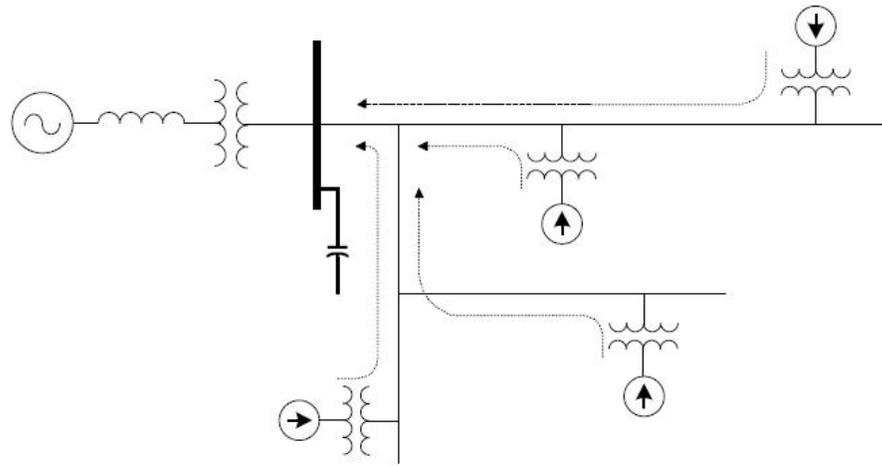


Figura 4.12. Propagação de harmônicos pela rede.

Uma vez obtidas as correntes harmônicas de todas as cargas não lineares, determinam-se as tensões harmônicas em todos os pontos pela expressão matricial (4.27). A diferença da varredura em frequência, é que todos os elementos do vetor I_h , que representam as injeções das cargas não lineares, têm valor diferente de zero.

A matriz de impedância da rede para cada harmônico Z_h é determinada como o inverso da matriz de admitância Y_h que se constrói a partir dos modelos estabelecidos para os diferentes elementos do sistema elétrico (Arrillaga & Watson, 2003); (Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, 1996) como mostra 4.31.

$$Z_h = Y_h^{-1} \quad (4.31)$$

Como mostrado em 4.31, o método parte de um desacoplamento para o cálculo das tensões de cada frequência, de modo que o procedimento se repete ciclicamente para cada harmônico injetado pelas cargas não lineares.

Percebe-se que o processo dá origem as tensões de todos os harmônicos em todos os nós da rede e se calculam as correntes harmônicas que circulam por todos os elementos do sistema, assim como indicadores de distorção harmônica de tensão e corrente.

4.6 Implementação

No desenvolvimento deste trabalho, foram implementados em linguagem MATLAB[®] 2012b os métodos de análises de harmônicos: varredura de frequência e fluxo de harmônicos para ser utilizados como parte do programa de otimização desenvolvido.

Para a implementação destes métodos, utilizou-se a modelagem em coordenadas de fase e, em particular, os modelos que foram explicados neste capítulo.

O fluxo de harmônicos desenvolvido é utilizado como parte integrante do programa de otimização que será apresentado no capítulo 5 para avaliar a propagação de harmônicos no sistema a partir de uma condição de operação determinada.

O programa de varredura de frequência é utilizado como uma ferramenta adicional para o programa de otimização a fim de avaliar o comportamento das distintas soluções dos filtros selecionados.

Para programar o fluxo de harmônicos nesta tese, desenvolveram-se duas funções principais no Matlab que se explicam a seguir.

4.6.1 Função *loadflow*

A função *loadflow* executa o fluxo de potência à frequência fundamental em uma rede elétrica industrial por meio do método iterativo de Gauss utilizando a matriz impedância de barra. Esta função tem a seguinte sintaxe:

```
function data = loadflow(data,stat) (4.32)
```

Onde *data* é uma estrutura do Matlab que permite fornecer os dados necessários da rede, as cargas e os filtros de harmônicos. Estes dados tem sido previamente processados por outras funções do programa de otimização desenvolvido. Ao mesmo tempo, a estrutura *data* recebe os resultados do fluxo de potência para o cenário *stat* especificado. Os resultados calculados para esta função incluem:

- ✓ Tensões à frequência fundamental calculadas nas barras;
- ✓ Correntes à frequência fundamental que circulam em todos os elementos da rede elétrica: transformadores, linhas, cargas lineares e não lineares, nos filtros harmônicos, etc., e;

- ✓ Perdas de potência ativa e reativa na frequência fundamental em todos os elementos da rede elétrica.

4.6.2 Função *harmflow*

A função *harmflow* se encarrega de realizar o fluxo de potência para todas as frequências harmônicas presentes em uma rede elétrica industrial por meio do método de injeções de corrente ou método de penetração de harmônicos. Esta função tem a seguinte sintaxe:

```
function data = harmflow(data,stat) (4.33)
```

Onde *data* é uma estrutura do Matlab que permite fornecer os dados necessários da rede, as cargas e os filtros harmônicos, assim como os dados do fluxo de harmônicos à frequência fundamental previamente calculado pela função *loadflow*. Desta forma, a estrutura *data* recebe os resultados do fluxo de potência de harmônicos para o cenário *stat* especificado. Os resultados calculados por esta função incluem:

- ✓ Tensões de todas as frequências harmônicas calculadas nas barras;
- ✓ Correntes de todas as frequências harmônicas que circulam em todos os elementos da rede elétrica: transformadores, linhas, cargas lineares e não lineares, dos filtros de harmônicos, etc.;
- ✓ Indicadores de distorção harmônica total *THD* e individual *IHD*, calculadas em todas as barras;
- ✓ Índice de distorção total da demanda *TDD* e individual *IDD* no ponto de conexão comum *PCC* com o sistema de fornecimento, e;
- ✓ Perdas de potência ativa e reativa em todas as frequências harmônicas e totais em todos os elementos da rede elétrica.

4.6.3 Programa *freqscan*

O programa *freqscan* executa a varredura de frequência em uma rede elétrica industrial. Esta função tem a seguinte sintaxe:

```
function data = freqscan(netfun) (4.34)
```

Onde *netfun* é uma função do Matlab que contém a descrição da rede e os dados necessários para o programa. Desta forma, a estrutura *data* recebe os resultados da varredura de frequência, que são os gráficos de impedância versus frequência para qualquer barra do sistema quando são feitos de qualquer tipo: trifásicas, monofásicas, nos nós especificados.

CAPÍTULO V

OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO PARA O PROJETO DE FILTROS PASSIVOS

5.1 Introdução

Os filtros passivos paralelos são compostos de um arranjo de capacitores, indutores e resistores que, devem ser calculados de forma adequada para conseguir uma redução significativa da distorção de tensão, evitando a circulação das correntes harmônicas pelo sistema elétrico.

Normalmente, estes filtros podem ser especificados pelo seu tipo, sua potência reativa à frequência fundamental, frequência de sintonia e seu fator de qualidade. Desta maneira, quando se considera a otimização do projeto de filtros passivos, entende-se que é a determinação dos parâmetros do filtro para assegurar o melhor desempenho dos mesmos. No entanto, isto não pode ser obtido sem as considerações econômicas de viabilidade do projeto.

Entretanto, em uma rede industrial podem ser instalados diversos filtros harmônicos, de modo que a otimização deve considerar o desempenho satisfatório do conjunto de filtros a ser instalado.

Vários antecedentes devem ser considerados quando se precisa formular o problema e programar uma ferramenta computacional para a otimização de filtros passivos em sistemas elétricos industriais, entre os quais:

- 1) Considerar explicitamente como objetivo a maximização dos benefícios econômicos produzidos pelos filtros para a empresa industrial;

- 2) Desenvolver uma ferramenta computacional que permita não só a determinação dos parâmetros de projeto de certos tipos de filtro, mas também otimize a seleção do tipo de filtro a ser utilizado;

- 3) Considerar vários cenários de operação das cargas, da rede de energia e dos filtros harmônicos, para que os resultados tenham um bom desempenho integral em todas as condições.

5.2 Formulação do problema

Dadas às questões levantadas, esta tese formula o problema de otimização do projeto de filtros passivos em sistemas elétricos industriais como um problema multiobjetivo que busca a seleção e o projeto de filtros passivos necessários para atender aos seguintes objetivos:

- 1) Maximizar o Valor Presente Líquido (VPL) do projeto dos filtros da instalação;
- 2) Minimizar a distorção total de corrente no PCC, e;
- 3) Minimizar a distorção total da tensão nas barras do sistema elétrico industrial.

Sujeito às restrições de:

- 1) Atendimento das normas de qualidade da energia vigentes;
- 2) Atendimento às especificações técnicas.

5.2.1 Variáveis do problema

As variáveis independentes do problema de otimização, representadas pelo arranjo X , são os tipos de filtros passivos a instalar e seus respectivos parâmetros de projeto.

Em um algoritmo genético as variáveis do problema são codificadas de algum modo num cromossomo que representa os dados correspondentes a uma solução ou indivíduo. A implementação computacional do NSGA-II utilizada neste trabalho usa uma codificação direta em números reais, facilitando a interpretação dos dados armazenados nesse cromossomo.

Para representar num cromossomo um conjunto de dados que pode ser de tamanho variável (o tipo de filtro e o número de ramos escolhidos podem ser diferentes de uma solução para a outra), este cromossomo deve ser capaz de representar o número máximo de dados que define um filtro.

Para a localização dos filtros passivos na instalação industrial, deve-se determinar um conjunto de barras K onde tais filtros devem ser instalados. Estas barras são normalmente aquelas em que há significativas cargas não lineares importantes ou centros de distribuição que apresentem um conjunto de tais cargas (IEEE Std 1531, 2003).

O cromossomo que representa os dados de um indivíduo, consiste de um arranjo dos K elementos, onde cada elemento s_k , conforme ilustrado na Tabela 5.1 é um arranjo de dados inteiros e reais que representam os vários parâmetros do filtro harmônico para ser localizado na barra k .

Tabela 5.1: Variáveis que descrevem um filtro representados no cromossomo

Variável	Descrição
Cfg	Tipo de configuração (1, 2, 3, 4)
m	Número de ramos sintonizados (se for filtro do tipo 1)
Qc	Potência reativa total nos capacitores
Fd_1, \dots, Fd_{w+1}	Fatores de distribuição da potência reativa entre todos os ramos
Fq_1, \dots, Fq_{w+3}	Frequências de sintonia de todos os ramos
Q_1, \dots, Q_{w+3}	Fatores de qualidade de todos os ramos

Como o objetivo principal deste trabalho é fazer com que o algoritmo de otimização possa selecionar o tipo e número de ramos M de cada filtro, deve-se primeiro definir as possíveis configurações de filtro.

As variáveis inteiras Cfg e m são utilizadas para definir o tipo de configuração e o número de ramos selecionados pelo algoritmo genético pelos filtros sintonizados da barra k .

Como pode ser visto na Tabela 5.1, a variável Cfg só pode assumir os valores (1, 2, 3 ou 4) na otimização, que correspondem às quatro configurações típicas de filtros recomendadas por (Arrillaga & Watson, 2003), as quais são descritas a seguir:

- 1) Configuração Tipo 1: Múltiplos ramos sintonizados;
- 2) Configuração Tipo 2: Um único ramo passa alta de segunda ordem;
- 3) Configuração Tipo 3: Múltiplos ramos sintonizados e um ramo de segunda ordem, e;
- 4) Configuração Tipo 4: Dois ramos passa-alta de segunda ordem.

A configuração tipo 1, conforme Figura 5.1, está composta de um arranjo de m ramos sintonizados para eliminar os harmônicos de tensão de baixa ordem ($h \leq 13$) mais significativos, na barra em consideração. O fator de qualidade de cada ramo é alto ($10 \leq Q \leq 50$).

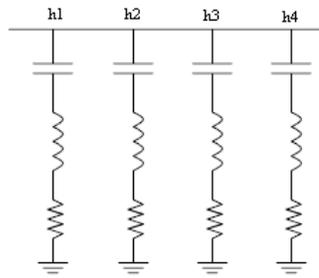


Figura 5.1: Configuração tipo 1.

Os filtros podem ser selecionados em 1, 2, ..., m ramos, dependendo do valor da variável m , que é limitado pelo número máximo de ramos sintonizados (w), que pode ter um filtro, sendo w uma constante pré-definida pelo especialista.

As frequências do ajuste dos ramos sintonizados são pré-selecionadas a partir dos indicadores de distorção da tensão na barra k onde o filtro será instalado. Essas frequências não correspondem exatamente às frequências h_1, h_2, \dots, h_m dos harmônicos que se deseja eliminar, mais estes ramos são sintonizados a 95% dessas frequências para prevenir a amplificação dos harmônicos inferiores mais próximos das frequências que se desejam filtrar (Dugan *et. al*, 2004); (Nassif & Xu, 2007).

A configuração tipo 2, apresentada na Figura 5.2, é composta por um único ramo passa alta de segunda ordem que serve para reduzir uma larga banda de harmônicos. Este ramo está sintonizado numa frequência entre aquelas das fontes de harmônicos existentes no circuito. O fator de qualidade é baixo ($0,5 \leq Q \leq 10$) para que se possa atingir uma boa filtragem das frequências superiores.

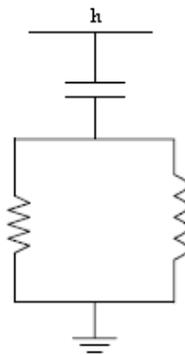


Figura 5.2. Configuração tipo 2

A configuração tipo 3 mostrada na Figura 5.3, composta de $M = m+1$ ramos, compreende um filtro de configuração tipo 1 para eliminar as frequências de baixa ordem e um ramo passa alta de segunda ordem para filtrar as frequências superiores.

A parte de configuração tipo 1 é formada da maneira previamente explicada, e o ramo passa alta de segunda ordem é sintonizado a uma frequência superior do ramo sintonizado na máxima ordem harmônica h_m . O fator de qualidade deste ramo é baixo ($0.5 \leq Q \leq 10$).

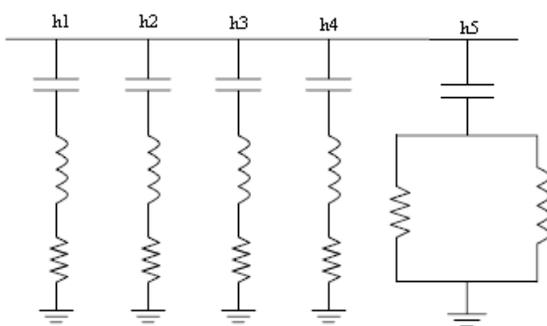


Figura 5.3: Configuração tipo 3

A configuração tipo 4 mostrada na Figura 5.4 com $M = 2$ ramos, está composta por dois ramos passa alta de segunda ordem. O primeiro ramo está sintonizado numa frequência de baixa ordem ($h \leq 13$) com um fator de qualidade alto ($Q \leq 10 \leq 50$). O segundo ramo é sintonizado numa frequência de ordem alta ($h > 13$) com um fator de qualidade baixo ($0,5 \leq Q \leq 10$).

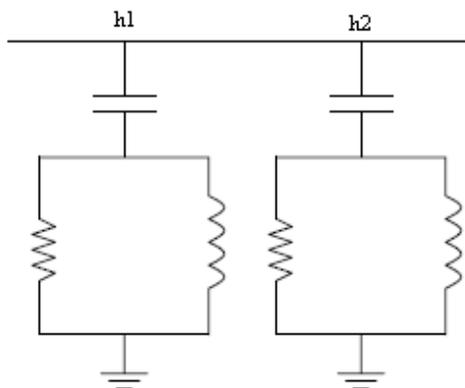


Figura 5.4: Configuração tipo 4

A potência reativa total Q_c dos capacitores do filtro é um valor real cuja magnitude foi limitada entre 0,5 e 1,5 vezes a potência reativa máxima que é recebida a partir da fonte na barra k onde o filtro é instalado.

Como a configuração de maior número de ramos (configuração 3) tem $M = m+1$ ramos, os fatores de distribuição da potência reativa Fd_1, \dots, Fd_{w+1} formam um arreglo de $(w+1)$ valores reais delimitados entre 1 e 10, representando a forma com que se distribui a potência reativa total Q_c selecionada entre os M ramos do filtro.

Se o fator de distribuição do ramo i é Fd_i , a potência reativa do capacitor correspondente a esse ramo é calculada da seguinte maneira:

1) Determinar a potência reativa do capacitor Q_{c_i} proporcional ao valor do fator de distribuição do ramo conforme (5.1):

$$Q_{c_i} = Q_c \cdot Fd_i / \sum_{j=1}^M Fd_j \quad (5.1)$$

2) Determinar o valor padrão do capacitor $Q_{c_i-padrão}$ que melhor se aproxima do valor da potência reativa Q_{c_i} .

Este procedimento permite que a distribuição da potência reativa por ramos seja determinada pelo próprio método de otimização a partir das necessidades do problema e não pré-fixada pelo usuário (Czarnecki & Ginn, 2005, Ginn, 2002).

O arranjo Fq_1, \dots, Fq_{w+3} de frequências de sintonia se emprega para representar as frequências dos ramos de segunda ordem que são obtidas no processo de otimização.

Os primeiros Fq_1, \dots, Fq_w elementos do arranjo representam as frequências a serem utilizadas pelo ramo de segunda ordem que sucede aos possíveis w ramos sintonizados na configuração 3. O objetivo de utilizar tantas variáveis para determinar a frequência de um único ramo ocorre porque os limites dos valores dessas frequências são diferentes em função do número de ramos do filtro selecionado. Por exemplo, se $m = 1$, só um filtro sintonizado de frequência h_1 é utilizado e a frequência do filtro Fq_1 de segunda ordem está limitada inferiormente por $Fq_1 \geq h_1 + 0.5$. Por outro lado, se $m = 2$, utilizam-se dois filtros sintonizados de frequência h_1, h_2 e a frequência do filtro de segundo ordem Fq_2 está limitada inferiormente por $Fq_2 \geq h_2 + 0.5$.

Os elementos Fq_{w+1} e Fq_{w+2} correspondem às frequências dos ramos de segunda ordem que são usados na configuração 4, onde $(h_{min} \leq Fq_{w+1} \leq h_m)$ e $(h_m+0.5 \leq Fq_{w+2} \leq h_{maz})$. Finalmente, o elemento Fq_{w+3} , representa a frequência do ramo de segunda ordem na configuração 2, onde $(h_{min} \leq Fq_{w+3} \leq h_{maz})$.

O arranjo Q_1, \dots, Q_{w+3} de fatores de qualidade representa os fatores de qualidade dos possíveis ramos do filtro. Os primeiros Q_1, \dots, Q_w elementos do arranjo representam os fatores de qualidade a serem utilizados pelos ramos sintonizados nas configurações 1 e 3 limitados por $(10 \leq Q_1, \dots, Q_w \leq 50)$.

Os elementos Q_{w+1} e Q_{w+2} correspondem aos fatores de qualidade dos ramos de segunda ordem que são usados na configuração 4, onde $(0.5 \leq Q_{w+1} \leq 10)$ e $(10 \leq Q_{w+2} \leq 50)$. Finalmente, o elemento Q_{w+3} , representa o fator de qualidade do ramo de segunda ordem na configuração 2, onde $(0.5 \leq Q_{w+3} \leq 50)$.

Desta maneira, como no conjunto de variáveis s_k tem $S = 3 + (w+1) + 2(w+3)$ elementos, e se o número limite dos ramos sintonizados limita-se a quatro ($w = 4$), então $S = 22$ variáveis. Deste modo, se forem instalados K filtros harmônicos, o cromossomo de um indivíduo (solução) fica composto por $K \times S$ elementos.

Uma vez avaliados os elementos do cromossomo, a configuração e parâmetros dos filtros passivos representados pelo arranjo X são determinados.

5.2.2 Funções objetivo

Antes de expressar matematicamente as funções objetivo da otimização, há de se explicar que o sistema elétrico transita no decorrer do tempo por diferentes cenários de operação. A variação da carga elétrica, ao longo do tempo, é a principal responsável pela existência de múltiplos cenários ou estados de operação do sistema. No entanto, qualquer alteração na estrutura e composição da geração, da carga do próprio sistema de distribuição e de seus componentes pode ser representada como um cenário para análise (Varetsky & Hanzelka, 2009); (Pragale, Dionise & Shipp, 2010).

5.2.2.1 VPL do projeto dos filtros

A instalação dos filtros harmônicos no sistema tem dois efeitos fundamentais: a redução da distorção harmônica das tensões e correntes; e a compensação da potência reativa da carga.

A redução da distorção harmônica da tensão nas barras do sistema melhora a qualidade de energia suprida às cargas, fornecidas do sistema elétrico da instalação industrial, assim como de outros consumidores que são alimentados a partir do PCC ou da barra em consideração. Embora se saiba que o aumento da qualidade da energia significa a redução nos custos de operação dos equipamentos elétricos, é difícil de avaliar economicamente este resultado.

Além disso, ao instalar os filtros são reduzidas as correntes que circulam pela rede na frequência fundamental, pelo grande aumento no fator de potência, e as frequências harmônicas pelo efeito de filtragem dos filtros. Ao reduzir as correntes harmônicas pela rede, é reduzido o carregamento dos geradores, transformadores, cabos e outros elementos do sistema, reduzindo as perdas nos mesmos. O impacto da redução das perdas pelo uso de filtros é mais fácil de avaliar economicamente quando se conhece os dados necessários da rede e das cargas.

Em uma empresa industrial, os componentes de custo da fatura de energia elétrica é uma forma conveniente para medir o custo anual do consumo de energia elétrica das instalações (*Custos*).

Para determinar o efeito econômico da instalação dos filtros, elege-se (*L*) cenários característicos da variação de carga diária para calcular o consumo de energia e o fator de potência da instalação. Estes cenários característicos correspondem aos diferentes níveis da carga que se repetem diariamente um tempo determinado.

Para cada cenário de carga diária, a potência ativa total (P_T) e a potência reativa total (Q_T) fornecida pela rede, assim como as perdas de potência ativa e reativa em cada elemento da instalação (incluindo os filtros) podem ser calculados mediante um programa de fluxo de potência na frequência fundamental e com um programa de penetração de harmônicos.

Usando os valores calculados de P_T e Q_T , a máxima demanda de potência ativa e reativa, assim como o consumo de potência ativa e reativa da instalação podem ser estimados para um dia de trabalho característico. Portanto, a fatura de energia elétrica mensal e anual pode ser estimada quando se considera um número de dias característicos de trabalho ao ano. Este método de

agregação pode ser mais ou menos exato, na medida em que se caracterize melhor a carga da instalação.

O Manual de Tarificação de Energia Elétrica da PROCEL (PROCEL, 2001) 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 fator de potência 0,92.

Como a carga do circuito varia em diferentes L estados de carga característicos, a energia faturada é a soma da potência ativa e potência reativa consumida em cada estado k da duração anual Δt_k :

$$E_F = \sum_{k=1}^L (P_{Tk} \cdot \Delta t_k + EREX_k) = \sum_{k=1}^L (P_{Tk} + DREX_k) \cdot \Delta t_k \quad (5.2)$$

Da mesma forma, a demanda faturada D_F é composta pela soma da demanda ativa e da demanda reativa excedente do cenário k de máxima carga.

$$D_F = \max_{k \in L} \{P_{Tk} + DREX_k\} \quad (5.3)$$

Assim, os custos anuais de faturamento de energia elétrica são calculados por:

$$Cost(x) = c_D \cdot D_F(x) + c_E \cdot E_F(x) \quad (5.4)$$

Onde c_D (\$/kW) e c_E (\$/kWh) são coeficientes do custo da taxa elétrica correspondente.

Assim, os benefícios da instalação dos filtros para os L cenários característicos são determinados como a diferença entre o custo anual de fatura de energia elétrica antes $Cost(0)$ e após a instalação dos filtros harmônicos $Cost(x)$.

O custo de investimento dos filtros $I(x)$ está composto pelos custos do capacitor, reator, resistor e outros elementos. Os custos do capacitor, reator e resistor dependem linearmente da sua potência para cada nível de tensão, enquanto que os outros componentes do custo podem ser assumidos proporcionalmente à potência reativa do filtro (Kawann & Emanuel, 1996).

Assim, o custo de investimento do filtro é:

$$I(x) = \sum_{i \in C_C} K_{Ci} Q_{Ci} + \sum_{i \in C_L} K_{Li} Q_{Li} + \sum_{i \in C_R} K_{Ri} P_{Ri} \quad (5.5)$$

Onde $K_C(\$/kvar)$, $K_L(\$/kvar)$ e $K_R(\$/kW)$ são os coeficientes de custo da potência dos 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.

Considerando um período de avaliação de N anos com uma taxa de juros i , o VPL do projeto de instalação dos filtros é calculado como mostra a relação (5.6):

$$VPL(x) = -I(x) + \sum_{k=1}^N (Cost(0) - Cost(x))/(1+i)^k \quad (5.6)$$

Como objetivo do projeto de instalação dos filtros, o $VPL(x)$ deve ser maximizado. No entanto, normalmente os algoritmos genéticos trabalham minimizando as funções objetivo. Dessa maneira, a primeira função objetivo a minimizar é definida como mostra (5.7):

$$f_1(x) = -VPL(x) \quad (5.7)$$

5.2.2.2 Objetivos de controle de harmônicos

Os filtros harmônicos passivos são primariamente dispositivos de controle de harmônicos cuja função é evitar a circulação de correntes distorcidas através dos elementos do sistema, reduzindo as distorções harmônicas de tensão nas barras.

Para avaliar o efeito dos filtros nas taxas de distorção, todos os possíveis cenários de operação do sistema devem ser avaliados, incluindo os L cenários característicos considerados e outro conjunto de condições especiais do sistema e da carga.

Estas condições especiais podem incluir variações na impedância da rede, diferentes modos de operação das cargas produtoras de harmônicos, de sintonização dos filtros, etc. São estados de operação não característicos para os quais não é atribuído um tempo de funcionamento diário, com impactos nos cálculos de energia, fator de potência, etc., mas com influência na determinação das taxas de distorção harmônica.

Para cada cenário k considerado, a distorção total da corrente no PCC (TDD_k) e a distorção total da tensão em cada barra i ($THD_{k,i}$) podem ser calculadas por um programa de fluxo de harmônicos. Ambas as taxas, a distorção total de corrente no PCC e as distorções totais

de tensão nas barras deverão ser minimizadas pelo processo de otimização (Dugan *et. al*, 2004); (Arrillaga & Watson, 2003).

Para minimizar o *TDD* em todos os cenários possíveis seria necessário definir uma função objetivo para cada cenário. No entanto, considerando que todas as normas de controle de harmônicos limitam apenas o valor máximo (probabilidade de 95% ou 99%) da distorção harmônica, fica mais fácil apenas minimizar só o máximo valor do *TDD* de todos os cenários de operação do sistema como mostra (5.8), (IEC 61000-3-6 (IEC/TR, 2008-02); IEEE 519 (IEEE Std 519-1981-2004), PRODIST-Módulo 8 (ANEEL, 2010):

$$f_2(x) = \max_{k \in W} \{TDD_k(x)\} \quad (5.8)$$

Seguindo o mesmo raciocínio, minimiza-se o máximo valor do *THD* entre todos os cenários de operação e todas as barras do sistema empregando a função f_3 de acordo com (5.9).

$$f_3(x) = \max_{\substack{k \in W \\ i \in U}} \{THD_{k,i}(x)\} \quad (5.9)$$

5.2.3 Restrições

O corpo de restrições do problema de otimização dos filtros consideram:

1. As restrições de qualidade da tensão nas barras do sistema;
2. As restrições da qualidade das correntes no PCC, e;
3. Restrições de saturação dos componentes do filtro.

A forma de avaliação das restrições de qualidade da tensão e corrente depende da norma adotada para formular o problema. Se utilizados os padrões da norma PRODIST-Módulo 8 ou IEC 61000, não se dispõe de limites para a distorção da corrente no PCC, então este conjunto de restrições não é levado em conta. Logo, a formulação aqui utilizada considera todas as restrições possíveis de acordo com as normas adotadas.

Além disso, para garantir que o programa de otimização obtenha soluções viáveis ao problema, define-se uma quarta função objetivo a minimizar que representa a soma quadrática de

todas as violações das restrições do problema como é mostrado em (5.10):

$$f_4(x) = \sum_{v_i(x) > l_i} (v_i(x) - l_i)^2 \quad (5.10)$$

Onde v_i e l_i representam o valor calculado e o valor limite do parâmetro i limitado pelas restrições correspondentes.

Para determinar o valor de f_4 para um conjunto de filtros x instalados, têm-se o seguinte procedimento (as sentenças estão escritas em pseudocódigo):

- 1) Inicializa-se com $f_4 = 0$.
- 2) Para cada cenário k de operação e cada barra i do sistema, avalia-se as restrições de qualidade da tensão do tipo:
 - a) Limite o valor do módulo da tensão $Vm_{k,i}$ de acordo com (5.11).

$$\text{if } Vm_{k,i} > Vlim_i, f_4 = f_4 + (Vm_{k,i} - Vlim_i)^2 \quad (5.11)$$

- b) Limite a distorção total da tensão $THD_{k,i}$ como mostra (5.12).

$$\text{if } THD_{k,i} > THDlim_i, f_4 = f_4 + (THD_{k,i} - THDlim_i)^2 \quad (5.12)$$

Para cada harmônico h , avalia-se a restrição de limite da distorção individual da tensão $IHD_{k,i,h}$ como mostra (5.13)

$$\text{if } IHD_{k,i,h} > IHDlim_{i,h}, f_4 = f_4 + (IHD_{k,i,h} - IHDlim_{i,h})^2 \quad (5.13)$$

- 3) Para cada cenário k de operação do sistema (só para a norma IEEE Std. 519), avaliam-se as restrições de qualidade da corrente no PCC do tipo:
 - a) Limite a distorção total da demanda TDD_k de acordo com (5.14)

$$\text{if } TDD_k > TDDlim, f_4 = f_4 + (TDD_k - TDDlim)^2 \quad (5.14)$$

Para cada harmônico h , avalia-se a restrição de limite da distorção individual da demanda de corrente $IDD_{k,h}$ como mostra (5.15)

$$\text{if } IDD_{k,h} > IDDlim_h, f_4 = f_4 + (IDD_{k,h} - IDDlim_h)^2 \quad (5.15)$$

4) Para cada cenário k de operação do sistema e cada capacitor j dos filtros instalados, avaliam-se as restrições de saturação dos capacitores do tipo:

a) Limite a tensão aplicada ao capacitor $V_{C_{k,i}}$ de acordo com (5.16)

$$\text{if } V_{C_{k,j}} > 1.1V_{cnom_j}, f_4 = f_4 + (V_{C_{k,j}} - 1.1V_{cnom_j})^2 \quad (5.16)$$

b) Limite a tensão de pico aplicada ao capacitor $V_{C_{peak_{k,j}}}$ de acordo com (5.17)

$$\text{if } V_{C_{peak_{k,j}}} > 1.2\sqrt{2}V_{cnom_j}, f_4 = f_4 + (V_{C_{peak_{k,j}}} - 1.2\sqrt{2}V_{cnom_j})^2 \quad (5.17)$$

c) Limite a corrente circulante pelo capacitor $I_{C_{k,i}}$ de acordo com (5.18)

$$\text{if } I_{C_{k,j}} > 1.35I_{cnom_j}, f_4 = f_4 + (I_{C_{k,j}} - 1.35I_{cnom_j})^2 \quad (5.18)$$

d) Limite a potência reativa gerada pelo capacitor $Q_{C_{k,i}}$ de acordo com (5.19)

$$\text{if } Q_{C_{k,j}} > 1.35Q_{cnom_j}, f_4 = f_4 + (Q_{C_{k,j}} - 1.35Q_{cnom_j})^2 \quad (5.19)$$

Tendo avaliado todas as restrições do problema, f_4 tem como valor a soma quadrática de todas as violações de tais restrições. Se f_4 é zero, a solução x será viável, caso contrário ($f_4 \neq 0$) a solução não estará sendo eficiente com as características adotadas para uma ou várias restrições.

Então o problema de otimização global se define como mostrado em (5.20):

$$\min\{f_1(x), f_2(x), f_3(x)\} \text{ sujeito a } \{f_4(x) = 0\} \quad (5.20)$$

Existem diferentes formas de manipular as restrições em um problema de otimização. No entanto, como zero é o menor valor possível de f_4 e dispõe-se de um método de otimização multiobjetivo, o problema pode ser formulado como mostra em (5.21):

$$\min\{f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x)\} \quad (5.21)$$

Ao minimizar f_4 , o algoritmo trata de obter o valor zero desta função, em outras palavras, busca as soluções viáveis do problema. Desta forma, obtêm-se não só as soluções viáveis, mas também as quase viáveis ($f_4 \approx 0$), o que pode ser vantajoso nos problemas de solução muito difícil.

5.3 Algoritmo de otimização

O problema formulado para o projeto de filtros é não linear com variáveis reais e inteiras cuja solução requer um algoritmo de otimização multiobjetivo misto. Estes tipos de problemas de otimização apresentam várias funções objetivos, que quase sempre estão em conflito, e que se pretende otimizar simultaneamente (Pereira, 2011).

Em otimização multiobjetivo a noção de solução ótima é substituída pela noção de solução não dominada ou ótima de Pareto. Uma solução não dominada é uma solução admissível para a qual não é possível melhorar simultaneamente todas as funções objetivo; i.e., a melhoria numa função objetivo apenas pode ser alcançada por degradação de pelo menos uma das outras. Ou seja, uma solução admissível é dominada por outra sempre que ao passar da primeira para a segunda, exista melhoria de pelo menos uma função objetivo, permanecendo inalteradas as restantes (Clímaco *et al.* 2003).

Alguns métodos modernos de otimização com base no conceito de ótimo de Pareto são:

1. “*Niched Pareto Genetic Algorithm (NPGA)*”. O NPGA foi proposto por Horn *et. al.* (1993), diferenciando-se das abordagens anteriores essencialmente no tipo de mecanismo de seleção que utiliza. Ao contrário de outras abordagens (VEGA, NSGA e MOGA) que aplicam à seleção proporcional a aptidão, o NPGA combina a técnica de partilha do valor de aptidão com um mecanismo de seleção por torneio. Os algoritmos referidos nesta seção não utilizam qualquer estratégia de manutenção na população dos melhores indivíduos encontrados na pesquisa. Existem, no entanto, vários mecanismos para preservar estas soluções, utilizados em abordagens classificadas como elitistas.

2. *Weight-based Genetic Algorithm (WBGA)*. O WBGA foi introduzido por Hajela e Lin (1992). Tal como o nome sugere, neste algoritmo cada função objetivo $f_m(x)$ é multiplicada por um peso w_m ($m=1, \dots, M$). Cada indivíduo representa não só as variáveis de decisão, mas também os seus pesos associados. Os valores de avaliação dos indivíduos da população são determinados utilizando um método de soma ponderada, em que cada indivíduo da população tem associado uma combinação de pesos normalmente diferentes. Assim, não se determina apenas uma solução não dominada correspondente a uma combinação de pesos específica em cada iteração do AG, mas várias soluções não dominadas simultaneamente, correspondentes as várias combinações de pesos.

3. “*Vector Evaluated Genetic Algorithm (VEGA)*”. Schaffer (1984) foi o primeiro a implementar um AG para o cálculo de soluções não dominadas de um problema de otimização multiobjetivo, ao qual deu o nome de VEGA. Posteriormente este método foi comparado pelo seu autor, com uma técnica de pesquisa adaptativa aleatória, tendo-se observado um melhor desempenho por parte do VEGA (Schaffer, 1995).

Apesar de apresentar algumas limitações, devido a cada solução ser avaliada apenas para uma das funções objetivo e durante o processo de seleção das soluções as que são próximas das soluções ótimas individuais de cada objetivo serem às escolhidas, não atingindo a convergência para boas soluções de Pareto quando se faz o cruzamento destes “ótimos individuais”, este algoritmo é um ponto de referência na área do AEMO, pela sua simplicidade e também porque foi pioneiro na tentativa de implementação de um AG para tratar problemas multiobjetivo (Schaffer, 1995; Fonseca & Fleming, 1993 e 1995; Deb, 2001).

4. “*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)*”. Goldberg (1989) trata o procedimento de classificação das soluções por níveis de dominância. Foi implementado na sua totalidade, numa abordagem designada por NSGA (Srinivas & Deb, 1993).

Tal como o MOGA, este algoritmo também utiliza a seleção baseada no conceito de dominância para classificar as soluções. Neste algoritmo existe um mecanismo para distribuir as soluções por níveis de dominância e outro para preservar a diversidade entre soluções de cada frente não dominada. Os outros operadores genéticos, cruzamento e mutação, são utilizados da forma habitual sobre toda a população.

5. “*Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA)*”. O AEMO elitista proposto por Zitzler e Thiele (1998) com o nome SPEA mantém uma população externa de tamanho fixo, que guarda as soluções não dominadas. Em cada geração, as novas soluções não dominadas encontradas são comparadas com as já existentes nesta população externa, sendo guardadas as soluções não dominadas resultantes. Como o tamanho da população externa é limitado, para evitar que esta ultrapasse este limite, o SPEA utiliza uma técnica de agrupamento (*clustering*) que preserva as soluções mais dispersas. Neste algoritmo as elites também participam, conjuntamente com a população corrente, na aplicação dos operadores genéticos, na esperança de influenciar a condução da população para regiões mais interessantes do espaço de pesquisa. Poucos anos

depois de terem apresentado o SPEA, Zitzler *et al.* (2001) apresentaram uma versão melhorada deste algoritmo, a que chamaram SPEA II. As principais diferenças na versão de 2001 são:

- ✓ Para determinar o valor de aptidão de uma solução, o método de cálculo baseia-se no número de soluções que a dominam e no número de soluções que são dominadas por ela;
- ✓ Se necessário, para discriminar soluções com características de dominância idênticas, este método de cálculo do valor de aptidão incorpora uma técnica adicional para estimar a densidade de soluções nessa região do espaço de pesquisa;
- ✓ Como o tamanho da população externa é constante, no caso de não haver soluções não dominadas em número suficiente, ela pode conter também soluções dominadas, e;
- ✓ No processo de seleção, apenas participam soluções da população externa.

6. *Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)*. Deb *et al.* (2000) desenvolveram um algoritmo, NSGA-II, que usa um mecanismo de preservação e diversificação de soluções. Depois identifica várias frentes não dominadas, classificando a população em diferentes níveis de dominância. Existem muitos conceitos e definições particulares em otimização multiobjetivo. Como trabalha com problemas em que os objetivos encontram-se em conflito, não é possível obter uma solução ótima, mas um conjunto de soluções que constituem a frente ótima de Pareto. Nestas circunstâncias, ter como solução do problema um conjunto de soluções “ótimas” pode ser entendido no sentido de não se poder afirmar que, nesse conjunto, uma solução é melhor do que outra (i.e., o conceito de não dominância é o conceito chave em otimização multiobjetivo, mas é um conceito “pobre” no sentido em que não permite discriminação entre essas soluções) (Pereira, 2011; Brownlee, 2011) e (Deb *et al.*, 2000).

O algoritmo tem início na iteração ($t = 0$) com a geração aleatória de uma população P_0 , de tamanho N . Nessa população são identificadas várias frentes não dominadas, classificando as soluções em diferentes níveis de não dominância “*rank*”. A cada solução é atribuído um valor de aptidão igual ao seu nível de dominância, começando por 1 para as soluções da primeira frente (que são as soluções não dominadas da população). Este procedimento é conhecido como ordenamento não dominado “*non-dominated sorting*”.

Depois desta fase de inicialização do algoritmo, inicia-se uma fase comum a todas as gerações (iterações) que compreende os seguintes passos pela iteração t :

1) Aplica-se um mecanismo de seleção por torneio, baseado no valor da aptidão e da distância de multidões de forma a preservar a diversidade da população. A solução i ganha o torneio se: tiver melhor classificação (em termos de ordenação nas frentes não dominadas) do que a solução j , ou se tiver a mesma classificação e a solução i tiver uma distância de multidões superior à solução j . A distância de multidões é usada como uma estimativa da densidade de soluções na vizinhança de uma solução i ;

2) São aplicados os operadores genéticos cruzamento e mutação, para construir uma população de descendentes, Q_t , de tamanho N que é combinada com a população P_t para formar uma terceira população R_t composta dos progenitores e descendentes;

3) As soluções da população R_t resultante (com tamanho $2N$), são classificadas por níveis de dominância para identificação das diferentes frentes não dominadas, e;

4) É feita uma nova população, P_{t+1} , a partir das soluções da população R_t (ver Figura 5.5). Como o tamanho de P_{t+1} é metade da de R_t , nem todas as frentes podem ser adicionadas à nova população. Isto implica que as piores frentes sejam ignoradas e que, ao adicionar a última frente possível à nova população, o número de soluções seja maior do que o espaço que sobra em P_{t+1} . Não havendo possibilidade de adicionar a totalidade de soluções da última frente possível, quando esta frente é adicionada, em vez de simplesmente se ignorar os elementos excedentes, é usada uma estratégia baseada em distância de multidões.

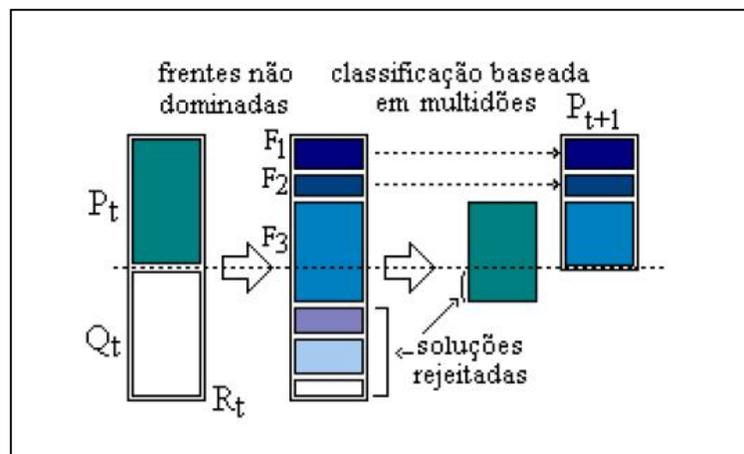


Figura 5.5: Obtenção da população P_{t+1} .

Fonte: Pereira, (2011).

5) Se a iteração corrente é menor do que o número pré-definido de gerações é incrementado $t = t + 1$ e se volta ao passo 1, mais em caso contrário o algoritmo termina.

Sheshadri (2012) lançou o código fonte em Matlab para NSGA-II que é utilizado no desenvolvimento do *software* de otimização desta tese. Algumas características desta implementação do NSGA-II são as seguintes:

- 1) O algoritmo fica codificado diretamente em números reais “real-coded GA”, assim, o cromossomo fica representado por um arranjo de números reais, e;
- 2) O operador genético cruzamento emprega a técnica do “*Simulated Binary Crossover SBX*”, a qual simula o cruzamento binário que existe na natureza. O cruzamento do elemento j de dois progenitores p_{1j} e p_{2j} é feito mediante o seguinte procedimento:
 - a. Gera-se um número aleatório u_j uniformemente distribuído entre 0 e 1.
 - b. Calcula-se o coeficiente β_j , mediante (5.22).

$$\beta_j = \begin{cases} (2u_j)^{\frac{1}{\mu+1}} & \text{se } u_j \leq \frac{1}{2} \\ (1/(2-2u_j))^{\frac{1}{\mu+1}} & \text{se } u_j > \frac{1}{2} \end{cases} \quad (5.22)$$

Onde μ é o índice de cruzamento selecionado ($\mu=20$) segundo (Sheshadri, 2012).

- a.
 - b.
 - c. Calcula-se os elementos j dos filhos c_{1j} e c_{2j} mediante (5.23).

$$\begin{aligned} c_{1j} &= \frac{1}{2}(1 + \beta_j)p_{1j} + \frac{1}{2}(1 - \beta_j)p_{2j} \\ c_{2j} &= \frac{1}{2}(1 - \beta_j)p_{1j} + \frac{1}{2}(1 + \beta_j)p_{2j} \end{aligned} \quad (5.23)$$

- 3) O operador genético mutação segue uma técnica tal como o cruzamento. A mutação do elemento j do pró-genitor p_j é feita mediante o seguinte procedimento:
 - a. Gera-se um número aleatório r_j uniformemente distribuído entre 0 e 1.
 - b. Calcula-se o coeficiente δ_j , mediante (5.24).

$$\delta_j = \begin{cases} (2r_j)^{\frac{1}{\mu m+1}} - 1 & \text{se } r_j < \frac{1}{2} \\ 1 - (1/(2-2r_j))^{\frac{1}{\mu m+1}} & \text{se } r_j \geq \frac{1}{2} \end{cases} \quad (5.24)$$

Onde μm é o índice de mutação selecionado ($\mu m=20$) (Sheshadri, 2012).

c. Calcula-se o elemento j do filho c_j mediante (5.25).

$$c_j = p_j + (x_{\max_j} - x_{\min_j})\delta_j \quad (5.25)$$

Onde x_{\max_j} e x_{\min_j} são os limites superior e inferior para a variável representada na posição j do cromossomo.

4) O algoritmo não tem um critério de convergência especial, mais termina quando se completa o número estabelecido de gerações.

Para poder utilizar o código de Sheshadri, foi necessário desenvolver algumas modificações que são descritas seguidamente (Sheshadri, 2012):

- 1) Depois que o operador genético de cruzamento é feito, os resultados c_{1j} e c_{2j} dos elementos j que são números inteiros são aproximados ao valor inteiro mais próximo.
- 2) Depois que o operador genético de mutação é feito, os resultados c_j dos elementos j que são números inteiros são aproximados ao valor inteiro mais próximo. Se o resultado $c_j < x_{\min_j}$, é avaliado $c_j = x_{\max_j}$, pelo contrário, se o resultado $c_j > x_{\max_j}$, é avaliado $c_j = x_{\min_j}$.
- 3) Além disso, os limites x_{\min_j} e x_{\max_j} são considerados na obtenção das soluções viáveis.

5.3.1 Avaliação da Função objetivo

Como todo algoritmo genético, o NSGA-II utiliza uma função para avaliar os quatro objetivos declarados f_1 , f_2 , f_3 e f_4 a partir do arranjo x de variáveis independentes do problema (cromossomo). Esta função foi desenvolvida no Matlab como mostra (5.26):

$$\text{function } [f, data] = \text{evaluate_objectives}(x, data) \quad (5.26)$$

Onde o parâmetro $data$ representa todos os dados adicionais para avaliar a operação do sistema para uma determinada solução (cromossomo x), e f recebe os resultados das funções objetivo calculadas.

O algoritmo da função “*evaluate_objectives*” é mostrado na Figura 5.6, e executado como descrito a seguir:

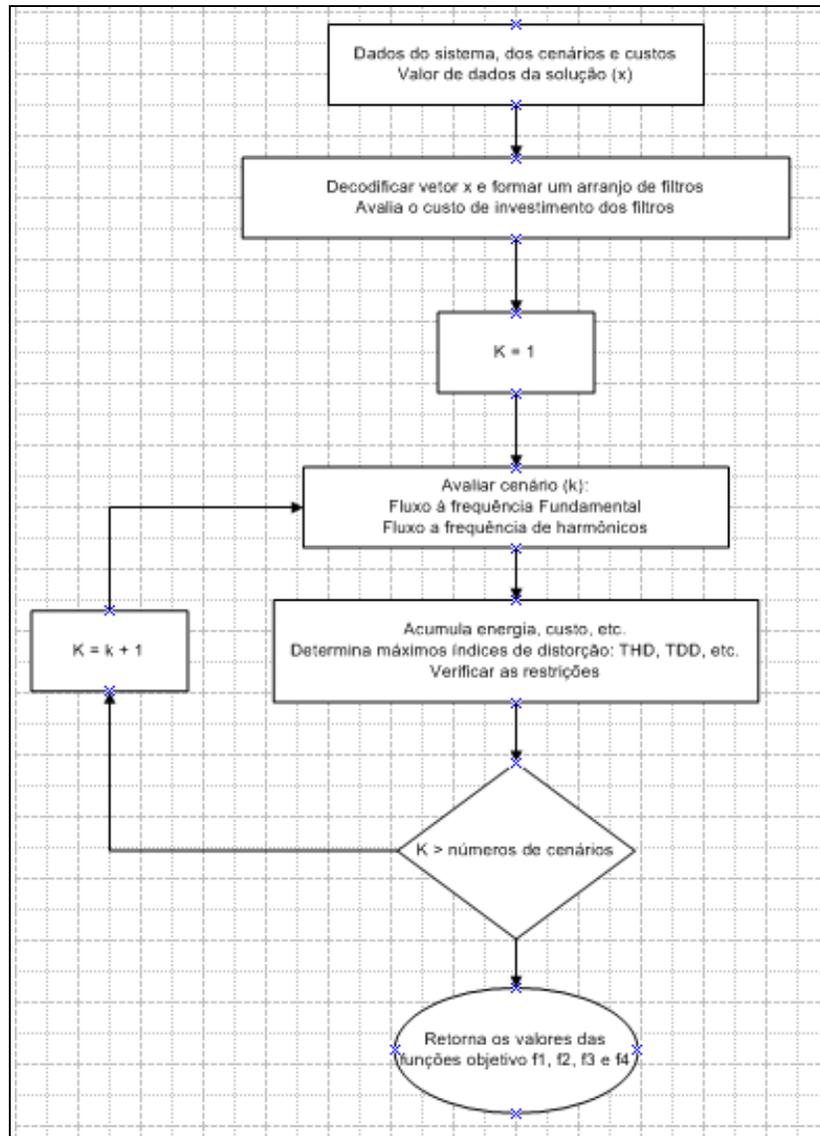


Figura 5.6. Algoritmo da função “*evaluate_objectives*”

- 1) Dado o arranjo X de solução (cromossomo), determinar os dados correspondentes ao conjunto de filtros a serem localizados no sistema industrial;
- 2) Calcular o custo de investimento dos filtros;

3) Para todos os W cenários possíveis, analisar a operação do sistema elétrico industrial, por meio da função “*loadflow*” (fluxo de potência na frequência fundamental) e da função “*harmflow*” (cálculo da penetração de harmônicos);

4) Com os resultados calculados para os L cenários característicos, calcular a fatura de energia elétrica, incluindo as perdas em todos os elementos e nos filtros. Com esses dados, avalia-se o $-VPL$ do projeto de compensação (f_1);

5) Calcular as taxas de distorção de tensões e correntes para todos cenários possíveis e determinar os máximos valores de TDD e THD (f_2 e f_3 , respectivamente), e;

6) Verificar as restrições de qualidade da energia e a saturação dos capacitores e calcular a função de restrições (f_4).

5.3.2 Algoritmo principal

O algoritmo principal de otimização representado na Figura 5.7, pode ser resumido como:

- 1) Analisar o caso base do sistema industrial (avalia o custo inicial e todas as taxas de harmônicos);
- 2) Obter as soluções ótimas de Pareto mediante o algoritmo NSGA-II;
- 3) Selecionar uma solução da população final do NSGA-II.

A otimização é realizada a partir da área de trabalho do Matlab, invocando a função desenvolvida *nsga2opt.m* com a seguinte sintaxe:

$$\text{function nsga2opt}(@filename, popsize, generations) \quad (5.27)$$

Onde *filename* é o nome do arquivo (*.m) que descreve os dados do problema a otimizar, *popsize* é o tamanho da população e *generations* é a quantidade de gerações a avaliar.

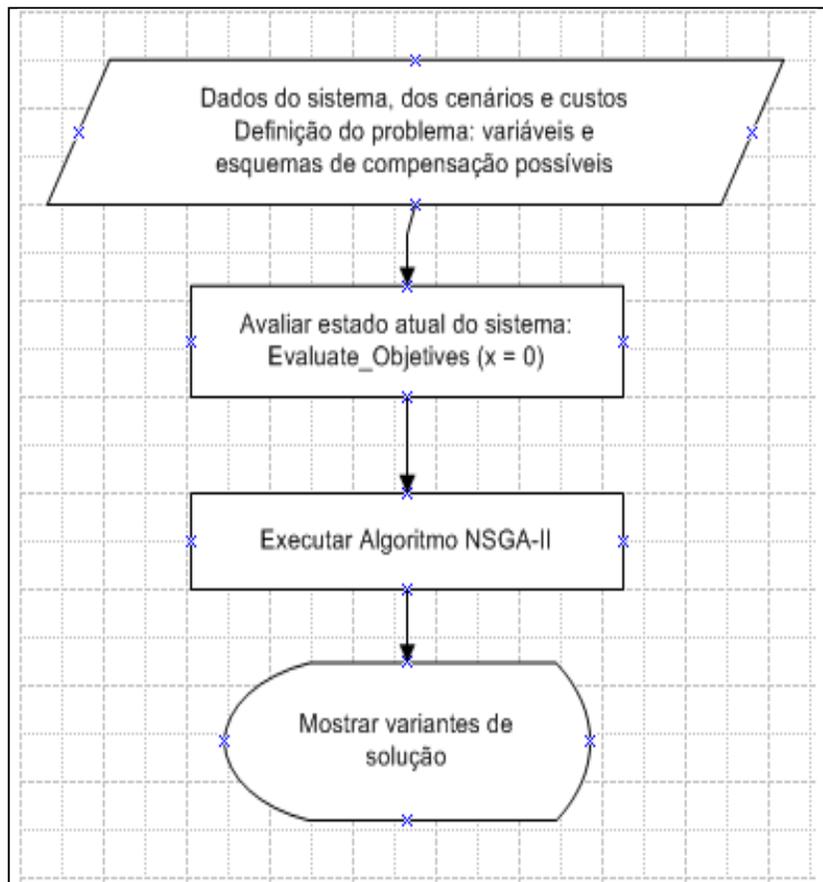


Figura 5.7: Algoritmo principal

Em cada geração, o algoritmo imprime os valores mínimos de cada função objetivo e parâmetros adicionais. Além disso, a cada dez gerações salva um arquivo (*results##.mat*) que contém todos os resultados da atual geração.

Obtido o arquivo de resultados para o número de gerações especificadas, este é examinado pela função desenvolvida *dispresults.m* que tem a seguinte sintaxe:

function *dispresults(resultfile)* (5.28)

Onde *resultfile* é o arquivo *result##.mat* da última das gerações.

A função *dispresults* mostra os resultados obtidos e seleciona as variantes a serem utilizadas de acordo com o seguinte algoritmo:

- 1) São selecionadas as variantes possíveis ($f_4 = 0$) da população final;
- 2) Dessas variantes, obtêm-se as soluções viáveis;
- 3) O resultado é apresentado graficamente (funções objetivo) para as diferentes variantes ordenadas, e;
- 4) A opção desejada é escolhida.

5.4 Análises da robustez das soluções

Após determinar as soluções viáveis do problema, é necessário escolher a variante a utilizar, de acordo com o critério do especialista (determinado pelo engenheiro) o que implica determinar uma ordem de prioridade para os objetivos da otimização que pode ser variável em função do caso em estudo e normas que se aplicam.

Além disso, embora as respostas do programa de otimização sejam as melhores, o algoritmo de otimização não examina todas as condições possíveis do sistema elétrico e, em particular, o comportamento dos filtros ante as variações de seus parâmetros (capacitâncias e indutâncias).

Para avaliar o desempenho da solução para variações nestes parâmetros e para todos os estados de carga considerados, podem-se usar os procedimentos seguintes:

- 1) Realizar múltiplas execuções do programa para avaliar a penetração das taxas de distorção harmônica em diferentes condições de sintonização dos filtros;
- 2) Executar uma varredura de frequência para determinar as possíveis coincidências das frequências dos harmônicos existentes com os picos de ressonância da impedância do sistema.

5.5 Exemplos de aplicação

Este exemplo corresponde a uma indústria que contém cargas de média e baixa tensão. O sistema elétrico utiliza uma rede de distribuição primária de 4160 V que alimenta as cargas de

média tensão e quatro subestações que alimentam as cargas de 480V. As cargas não lineares se concentram na parte de baixa tensão e estão formadas por conversores trifásicos de seis pulsos.

Neste caso considera-se que a tensão de todos os nós da rede deve cumprir com os indicadores de qualidade conforme estabelece a norma PRODIST-Módulo 8 da ANEEL. A instalação industrial está descrita de acordo com o diagrama unifilar mostrado na Figura 5.8 (Leite *et. al*, 2012).

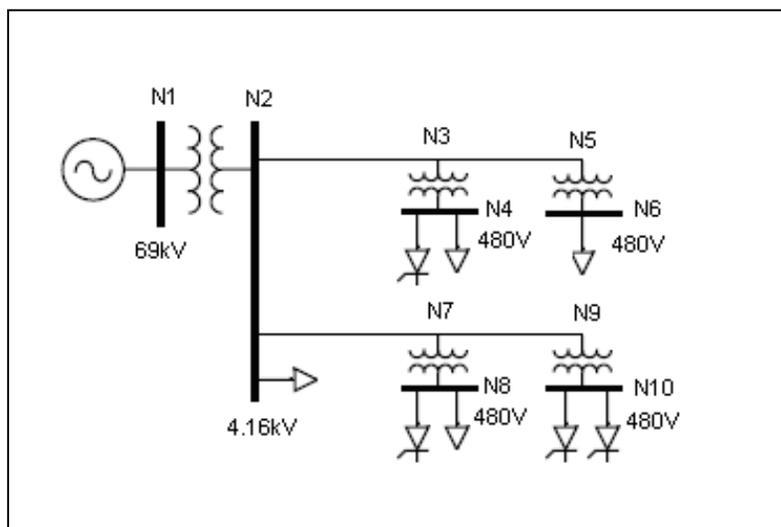


Figura 5.8: Exemplo de um Sistema

Os dados que descrevem a instalação industrial estão apresentados no Apêndice A.

Para o processo de otimização, são considerados cinco cenários de operação possíveis, os quais são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Cenários para as análises

Parâmetro	Cenários				
	1	2	3	4	5
Duração diária do cenário (h/día)	6	10	8	0	0
Depreciação da capacitância dos filtros $\Delta C(\%)$	0	0	0	0	10
Depreciação da indutância dos filtros $\Delta L(\%)$	0	0	0	-5	5
MVA de curto-circuito no PCC (MVA)	250	250	250	125	125

Os três primeiros cenários são regimes de carga característicos de um dia normal de trabalho da planta industrial, considerados para avaliar a fatura de energia de 12 meses, com 30 dias. Estes cenários não consideram depreciação dos componentes dos filtros, uma vez que supõem que os mesmos mantêm exatamente seus parâmetros do projeto.

Os cenários quatro e cinco são condições pessimistas de operação da rede com reduzidos MVA de curto-circuito no PCC. Além disso, esses cenários adicionam uma depreciação da capacitância (ΔC) e da indutância (ΔL) para todos os filtros que se instalem. As barras (N4, N8 e N10) foram selecionadas para a instalação de filtros considerando que são as que alimentam cargas não lineares.

Para avaliar a efetividade econômica (VPL) do projeto de compensação, foi considerada uma duração de cinco anos, com uma taxa de retorno de 10% ao ano. Os seguintes casos foram analisados:

- 1) Projeto de filtros para os três cenários característicos;
- 2) Projeto de filtros para os cinco cenários possíveis.

Em ambos os casos, foram utilizados os limites de harmônicos de tensão da norma PRODIST- Módulo 8 como restrições de qualidade da energia. Além disso, foram realizadas 100 gerações do algoritmo, com uma população de 500 indivíduos.

5.5.1 Projeto dos filtros para os três cenários característicos

Os resultados iniciais do problema (caso base), considerando só os três cenários característicos (1, 2 e 3) são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Resultados iniciais (caso 1)

Parâmetro	Valor
Custo anual da energia (\$/ano)	840124
Máximo TDD (%)	7.412
Máximo IDD (%)	6.498
Máximo THD (%)	8.349
Máximo IHD (%)	6.267
Fator de potência	0.797

De acordo com o PRODIST- Módulo 8, estes níveis de distorção estão dentro dos limites estabelecidos. Terminadas 100 gerações, o algoritmo genético produziu uma população de 500

soluções, para o exemplo. Extraíndo apenas soluções viáveis, os resultados obtidos são mostrados na Figura 5.9 para a fronteira de Pareto do problema.

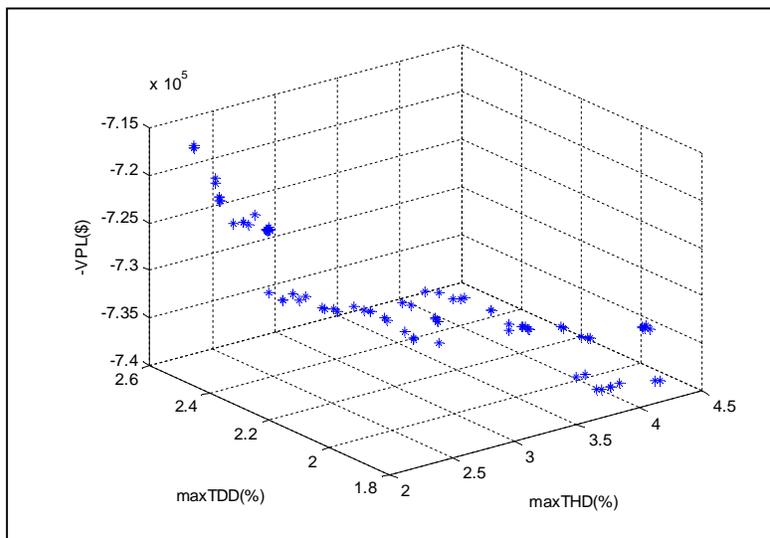


Figura 5.9: Espaço das soluções viáveis (caso 1)

Para selecionar a possível solução ao problema, considerando que a norma PRODIST - Módulo 8 apenas restringe a distorção da tensão, podem-se ordenar as soluções em ordem crescente do $maxTHD$, $maxTDD$ e $-VPL$ respectivamente.

A Figura 5.10 mostra as soluções ordenadas, onde na medida em que cresce o $maxTHD$, diminuem o $maxTDD$ e o $-VPL$.

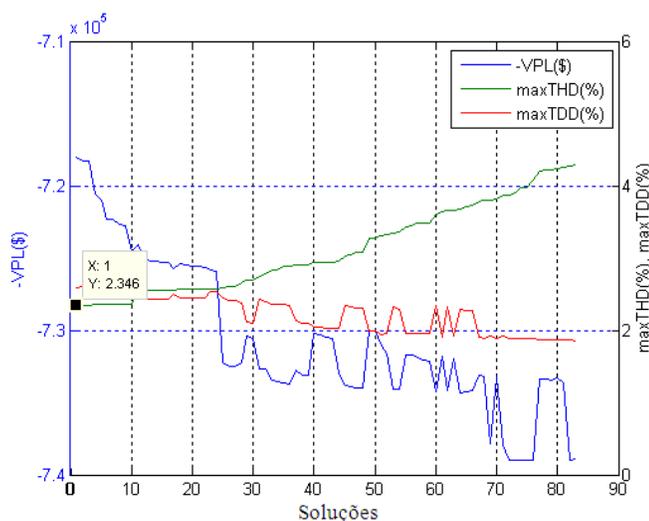


Figura 5.10.: Soluções ordenadas possíveis (caso 1)

Aqui, podem-se utilizar diferentes critérios para escolher a solução e ser usada. Se for selecionada a solução de menor distorção da tensão como mostra a Figura 5.10, obtém-se uma variante cujos parâmetros são mostrados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Parâmetros dos filtros selecionados (caso 1)

Barra	Parâmetro	Ramo 1	Ramo 2	Ramo 3	Ramo 4
N4	Tipo	sintonizado	2ª ordem		
	Capacitores	4x50 kvar	4x50 kvar		
	Frequência	4.7	7.6		
	Fator de qualidade	21.6	10		
N8	Tipo	sintonizado	sintonizado	sintonizado	2ª ordem
	Capacitores	4x50 kvar	1x50 kvar	2x50 kvar	1x50 kvar
	Frequência	4.7	6.6	10.4	13
	Fator de qualidade	37.9	19.8	22.2	8
N10	Tipo	sintonizado	sintonizado		
	Capacitores	3x50 kvar	2x50 kvar		
	Frequência	4.7	6.6		
	Fator de qualidade	28.1	34		

Esta solução é composta quase exclusivamente de filtros sintonizados, já que os ramos de segunda ordem selecionados têm um fator de qualidade alto. Sendo assim, pode-se obter uma solução só com filtros sintonizados, adotando-se as possíveis configurações das variáveis são dadas a uma só configuração do tipo 1. O programa desenvolvido admite essa possibilidade.

Os resultados que se obtém, ao instalar os filtros selecionados, são mostrados na Tabela 5.5, onde é comprovada uma grande redução dos indicadores de distorção harmônica e do custo anual de energia elétrica.

Tabela 5.5: Resultados finais (caso 1)

Parametro	Valor	%
Custo anual de energia (\$/ano)	638400	75.989
Máximo TDD (%)	2.596	35.024
Máximo IDD (%)	2.064	31.763
Máximo THD (%)	2.346	28.097
Máximo IHD (%)	1.635	26.090
Fator de potência	0.992	124.582
Custo de investimento dos filtros (\$)	46687	
VPL do projeto	718005	

Para comprovar a eficácia da solução para variações dos parâmetros dos filtros, executa-se o programa de penetração de harmônicos para todos os cenários com distinta depreciação

desses parâmetros e os resultados são mostrados na Figura 5.11, onde se comprova uma redução do *máximo TDD* entre 31 a 37% e do *máximo THD* entre 27,2 a 47,1% comparados aos valores do caso base para todos os cenários do problema e considerando as possíveis depreciações dos filtros.

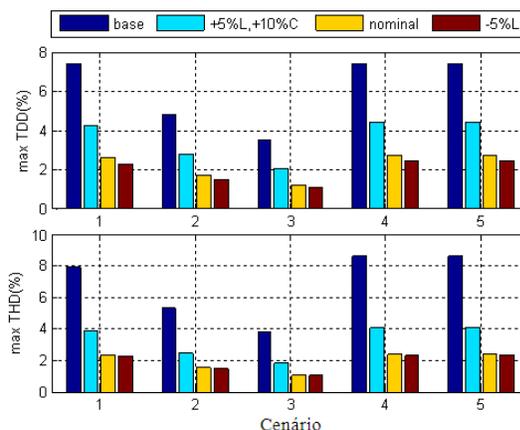


Figura 5.11: Resultados com depreciação dos filtros (caso 1)

Como mostra a Figura 5.11, os piores resultados são obtidos quando os componentes dos filtros têm uma depreciação positiva, o que reduz a frequência de sintonia, separando-as dos harmônicos a eliminar. Este mesmo comportamento se repete para os harmônicos individuais, o que se exemplifica para a distorção de corrente no PCC, apresentado na Figura 5.12 e a distorção de tensão na barra N10 mostrada na Figura 5.13 para o cenário 1.

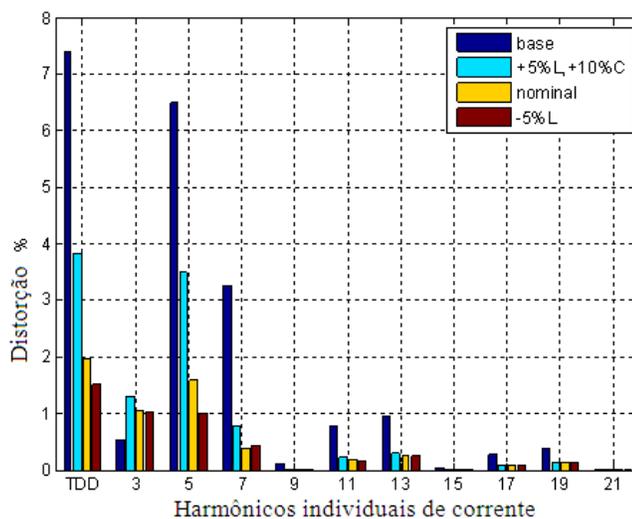


Figura 5.12. Distorção da corrente no PCC (caso 1)

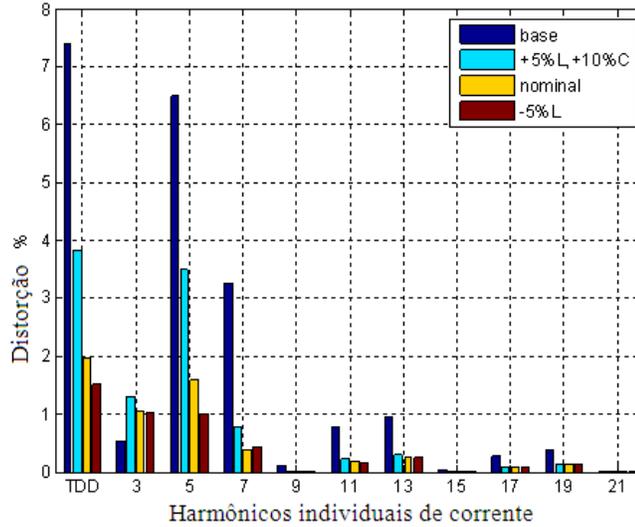


Figura 5.13: Distorção da tensão na barra N10 (caso 1)

No entanto, um estudo de varredura de frequência na barra N10, mostrada na Figura 5.14, onde se comparam as características da impedância \times frequência do caso base (sem filtros) e da resposta obtida para todos os cenários e com depreciação da capacitância (0 a +10%) e da indutância (-5% a +5%), mostra que os picos de impedância ocorrem em harmônicos de ordens baixas nas cargas não lineares existentes no problema. Assim, omite-se, nas figuras, este comportamento que se repete nas barras N8 e N4, e pelo que se pode concluir dos filtros selecionados terão um desempenho satisfatório.

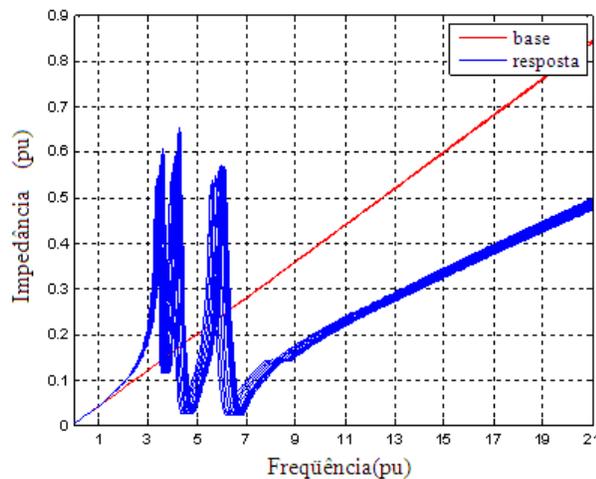


Figura 5.14: Varredura de frequência na barra N10

5.5.2 Projeto dos filtros para os cinco cenários possíveis

Neste caso, adicionam-se dois cenários não característicos que complicam o problema, pois os filtros devem ter um desempenho adequado para todos os cenários. Embora aumentem as taxas de distorção da tensão, igual ao caso anterior, não ocorrem violações da norma PRODIST Modulo 8, o que pode ser comprovado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Resultados iniciais (caso 2)

Parâmetro	Valor
Custo anual da energia (\$/ano)	840124
Máximo TDD (%)	7.412
Máximo IDD (%)	6.498
Máximo THD (%)	9.090
Máximo IHD (%)	6.818
Fator de potencia	0.797

A Figura 5.15 mostra as soluções ordenadas para o novo caso, onde se repete o comportamento observado previamente.

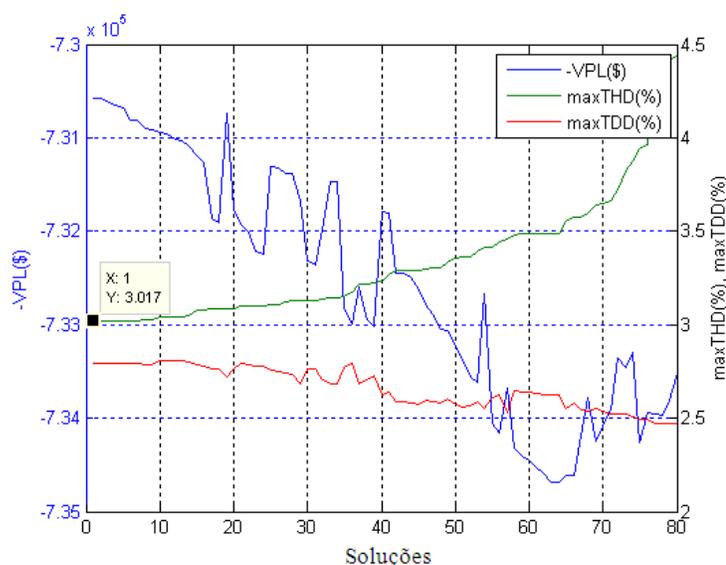


Figura 5.15. Soluções ordenadas (caso 2)

A solução escolhida apresentada, na Figura 5.15, está composta pelos filtros cujos parâmetros são mostrados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Parâmetros dos filtros selecionados (caso 2)

Barra	Parâmetro	Ramo 1	Ramo 2
N4	Tipo	2ª ordem	
	Capacitor	8x50 kvar	
	Frequência	5.6	
	Fator de qualidade	5.8	
N8	Tipo	2ª ordem	
	Capacitor	4x50 kvar	
	Frequência	5.5	
	Fator de qualidade	5.8	
N10	Tipo	sintonizado	sintonizado
	Capacitor	4x50 kvar	2x50 kvar
	Frequência	4.7	6.6
	Fator de qualidade	41.3	22.7

Para estes filtros, obtêm-se os resultados da Tabela 5.8, que demonstram uma redução apreciável dos limites de distorção, e se espera um bom VPL do projeto.

Tabela 5.8: Resultados finais (caso 2)

Parâmetro	Valor	%
Custo anual da energia (\$/ano)	637442	75.875
Máximo TDD (%)	2.795	37.711
Máximo IDD (%)	2.481	38.177
Máximo THD (%)	3.017	33.191
Máximo IHD (%)	2.594	38.040
Fator de potencia	0.982	123.218
Custo de investimentos dos filtros (\$)	37751	
VPL do projeto	739857	

Como se pode ver, na Figura 5.16, estes filtros têm um desempenho muito estável ante as variações de seus parâmetros L e C.

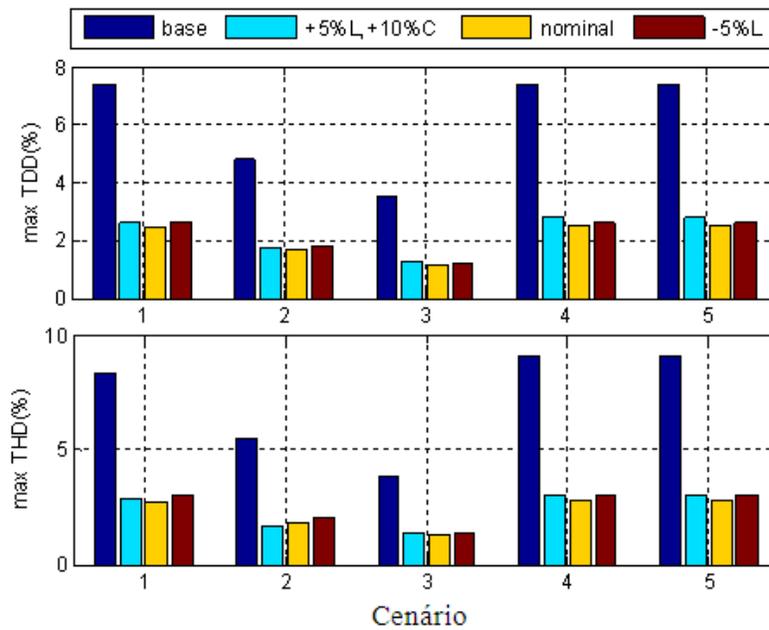


Figura 5.16. Resultados com depreciação dos filtros (caso 2)

Sendo assim, os resultados da varredura de frequência na Figura 5.17 mostram que os picos de impedância não coincidem com os harmônicos presentes e, portanto os filtros selecionados podem operar sem problemas.

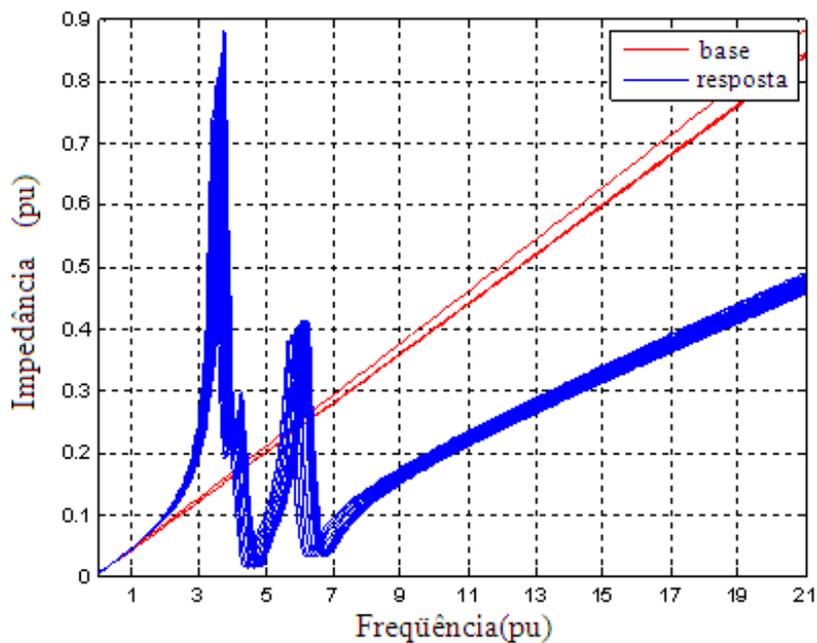


Figura 5.17. Varredura de frequência na barra N10

Como os casos 1 e 2 são muito semelhantes, compararam-se os resultados quanto as taxas de distorção TDD e THD das variantes de solução aplicadas no caso 2, esperando que a variante encontrada para este caso seja melhor, sobretudo para dos cenários 4 e 5. Os resultados são mostrados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9. Comparação entre as soluções 1 e 2 para caso 2.

Índice	Solução	Cenário					Max
		1	2	3	4	5	
maxTDD	1	2.596	1.699	1.234	2.445	4.450	4.450
	2	2.469	1.655	1.139	2.617	2.795	2.795
maxTHD	1	2.346	1.564	1.100	2.369	4.134	4.134
	2	2.742	1.834	1.280	3.017	3.017	3.017

Como era esperada, a solução do caso 2 se comporta melhor que a solução obtida para o caso 1.

5.6 Conclusões

A partir dos resultados obtidos, podem-se tirar as seguintes conclusões:

- 1) Para a obtenção de bons resultados, é necessário utilizar populações que superem várias vezes o número de variáveis do problema. Os casos considerados com três filtros foram aplicados com populações de 500 elementos (7.6 indivíduos por variável).
- 2) As respostas obtidas utilizam geralmente capacitores de diferentes potências para os diferentes ramos de um filtro. Isso é diferente das propostas de vários autores, que usam capacitores iguais para os diferentes ramos.
- 3) Devido às características dos algoritmos genéticos, não há garantia de que o tipo de configuração dos filtros escolhida pelo algoritmo seja a melhor. Percebe-se que o algoritmo produzirá um conjunto de boas soluções para o problema. Sendo assim, o programa tem a opção de restringir as possíveis soluções a escolher e prefixar a configuração desejada em cada caso.
- 4) É necessário melhorar as ferramentas para a seleção da variante final, a partir do conjunto de soluções viáveis, determinadas pelo algoritmo de otimização.

- 5) As soluções obtidas com o algoritmo devem ser analisadas para diferentes condições de depreciação da capacitância e indutância dos filtros e, desta forma, julgar corretamente o desempenho dos filtros selecionados.
- 6) O algoritmo de otimização desenvolvido pode se adaptar sensivelmente à programação paralela com o qual se reduziria drasticamente o tempo de execução do algoritmo.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

A partir dos resultados obtidos nesta tese, são possíveis as seguintes conclusões.

O problema de otimização da compensação de harmônicos por meio de filtros passivos foi formulado como um problema multiobjetivo que considera tanto os objetivos da redução da distorção harmônica como da efetividade econômica do projeto considerando as características do sistema de tarifação brasileiro. Além disso, a formulação apresentada considera as restrições relevantes impostas pelas normas brasileiras e estrangeiras.

A solução computacional para este problema foi conseguida, usando o algoritmo genético NSGA-II que determina um conjunto de soluções ótimas de Pareto (Fronteira) que permitem ao projetista escolher as soluções mais adequadas para o problema. Além disso, a ferramenta computacional desenvolvida tem varias novidades tais como:

- ✓ Não somente calcula-se os parâmetros que caracterizam os filtros, más também seleciona-se o tipo de configuração e o número de ramos do filtro em cada barra candidata de acordo a um conjunto de configurações preestabelecidas.
- ✓ Foram programadas duas normas para avaliação das restrições de qualidade da energia (Prodist- Modulo 8 e IEEE 519-92) que podem ser selecionadas pelo usuário.
- ✓ Determina-se soluções com bons indicadores do desempenho para vários cenários característicos e não-característicos do sistema que permitem representar: as variações diárias da carga, e das variações dos parâmetros do sistema e dos filtros.
- ✓ Avalia o custo das contas de energia numa rede elétrica industrial que tem diferentes condições de operação (cenários característicos) e avalia o efeito econômico de filtros harmônicos como compensadores de potência reativa.

Para desenvolver a ferramenta computacional desta tese, foi empregado um modelo trifásico em coordenadas de fase para redes de energia elétrica industriais e de serviços, para programar várias ferramentas computacionais adicionais. Estas ferramentas compreendem um programa de varredura de frequência, um programa do fluxo de harmônicos por injeção de correntes e um programa do fluxo de potência à frequência fundamental.

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

6.2 Algumas sugestões para continuidade deste trabalho

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

- 1) Avaliar o comportamento do programa com problemas de diferentes dimensões e estabelecer estratégias para seu uso;
- 2) Desenvolver um algoritmo para determinação automática do conjunto de nós candidatos para a localização de compensadores de potência reativa e harmônica em grandes redes;
- 3) Continuar trabalhando em modelos de cargas não lineares para determinar mais precisamente os harmônicos gerados e os possíveis efeitos dos filtros na rede;
- 4) Incorporar novos tipos de filtros passivos, tais como tipo C e o filtro de 3ª ordem e avaliar o seu comportamento;
- 5) Desenvolver uma variante do programa de otimização em programação paralela.

REFERÊNCIAS

ABDEL ALEEM, SHADY HOSSAM ELDEEN. ZOBAA, AHMED FAHEEM AND ABDEL AZIZ. MOHAMED MAMDOUH. **Optimal C-Type Passive Filter Based on Minimization of the Voltage Harmonic Distortion for Nonlinear Loads**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, No. 1, January. Pp 281. 2012.

ABRIL, I. PEREZ. **Cálculo de parámetros de filtros pasivos de armónicos**. Revista Ingeniería Energética, No.1, Vol. XXXIII, pp. 35-45. Referenciada por: SciELO. 2012.

ABRIL, I. PEREZ. LEITE, J.C. **Barrido de frecuencia en coordenadas de fase**. Revista Ingeniería Energética, No.3, Vol. XXXIII, pp. 196-204. Referenciada por: SciELO. 2012.

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

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.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Programas de Eficiência Energética (PEE) (ANEEL)**. Brasília-DF, Brasil. 2012.

AMAVEL LUIZ, 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, J. AND C. P. ARNOLD. **Computer Analysis of Power Systems**. New York: Wiley, 1990.

ARRILLAGA, J. AND N. R. WATSON. **Computer Modeling of Electrical Power Systems**. 2nd ed, New York:Wiley, 2001.

_____. **Power Systems Harmonic**. 2nd ed. New York: Wiley, 2003.

BROWNLEE. JASON. **Clever Algorithms: Nature-Inspired Programming Recipes**. Ed.Lulu. ISBN: 9781446785065. 2011.

BUDDINGH PAUL C. **Even harmonic resonance-an unusual problem**. Copyright Material IEEE Paper No. PCIC 2002-11.

CZARNECKI, LESZEK S. AND HERBERT L. GINN III. **The Effect of the Design Method on Efficiency of Resonant Harmonic Filters**. IEEE Transactions on Power Delivery.Vol. 20. N° 1. pp. 286-291. 2005.

CHANG, TIEN-TING AND HONG-CHAN CHANG. **Application of Differential Evolution to Passive Shunt Harmonic Filter Planning**. Paper accepted for presentation at the 8th International

Conference on Harmonics and Quality of Power. ICHQP'98, jointly organized by IEEE IPES and NTUA. Athens, Greece, October 14-16, 1998.

CHANG, Y.P. TSENG, W.K. and TSAO, T.F. **Application of combined feasible-direction method and genetic algorithm to optimal planning of harmonic filters considering uncertainty conditions.** IEE, 2005 IEE Proceedings online No. 20045203 doi:10.1049/ip-gtd:20045203, Paper first received 5th October 2004 and in final revised form 28th April 2005, IEE Proc. Gener. Transmission. Distribution., Vol. 152, No. 5, September 2005.

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 GARY W. 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.

CHANG, YING-PIN CHANG. LOW, CHINYAO AND WU, CHI-JUI. **Optimal Design of Discrete-Value Passive Harmonic Filters Using Sequential Neural-Network Approximation and Orthogonal Array.** IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 22, No. 3, July. pp. 1813-1821. 2007.

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, T.H., YANG, W.C., GUO, T.Y. AND PU, G.C. **“Modeling and analysis of asymmetrical three-phase distribution transformer banks with mid-tap connected to the secondary neutral conductor.”** EPRI, Vol. 54, pp. 83–89, 2000.

CHEN, T.H. AND YANG, W.C. **“Analysis of Multi-Grounded Four-Wire Distribution Systems Considering the Neutral Grounding”.** IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 4, pp. 710-717, October 2001.

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.

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.

CLÍMACO, J. N., C.H. ANTUNES E M.J. ALVES, **Programação linear multiobjetivo. Do modelo de programação linear clássico à consideração explícita de varias funções objetivo**. Universidade de Coimbra, 2003.

DEHINI,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 JATIT & LLS. All rights reserved. www.jatit.org 70. Department of Electrical Engineering, Bechar University, Algeria. Department of Commercial Sciences, University (center) of Relizane, Algeria E-mail: dehinirachid@yahoo.fr, ssefiane@hotmail.com. 2011.

DEB, KALYANMOY, **Evolutionary Algorithms for Multi-Criterion Optimization in Engineering Design, Evolutionary Algorithms in Engineering and Computer Science**, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 1999.

DEB, K., S. AGRAWAL, A. PRATAP, E T. MEYARIVAN, “**A fast elitist nondominated sorting genetic algorithm for multiobjective optimization: NSGA- II**”, Proceedings of Parallel Problem Solving from Nature VI, Springer, 849- 858, 2000.

DEB, K., **Multi-objective Optimization using Evolutionary Algorithms**, Wiley, Chichester, 2001.

DEB K, A. PRATAP, S. AGARWAL, T. MEYARIVAN. “**A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II**”. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.6, No. 2, pp 182–197, 2002.

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

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.

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

FONSECA C.M. & P.J. FLEMING P.J. “Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization”. Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms, pp. 316-323, 1993.

_____. “**An overview of evolutionary algorithms in multiobjective optimization**”. Evolutionary Computation 3(1), 1-16, 1995.

HAO YUE, GENGYIN LI, MING ZHOU, KANGNING WANG, JINHAO WANG. **Multi-objective Optimal Power Filter Planning in Distribution Network Based on Fast Nondominated Sorting Genetic Algorithms**. ISBN 978-1-4577-0365-2/11/\$26.00 ©2011 IEEE.

GOLDBERG, D.E. **Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning**. Addison-Wesley, 1989.

GINN, HERBERT. L.; B.S. **Improvement of resonant harmonic filter effectiveness in the presence of distribution voltage distortion**. A Dissertation Submitted to the Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in The Department of Electrical and Computer Engineering by Herbert L. Ginn III, B.S., Louisiana State University, 1996, M.S., Louisiana State University, 1998, May 2002.

HAJELA, P. LIN, C.Y. “**Genetic Search strategies in multicriterion optimal design**”. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, 3 (2). Springer, 99-107, 1992.

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.

HORN J, N. NAFFLOITIS e D. GOLDBERG, “**A niched Pareto genetic algorithm for multi-objective optimization**”, Proceedings of the first IEEE Conference on Evolutionary Computation (CEC'93) 1, IEEE Press, 82-87, 1993.

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.

IEC TR 61000-3-6 – “**Electromagnetic compatibility (EMC) –Part 3-6: Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems**”, Edition 2.0, 2008-02.

IEEE P519A/D7, “**GUIDE FOR APPLYING HARMONIC LIMITS ON POWER SYSTEMS** Prepared by the P519A. **Task Force of the Harmonics Working Group**. IEEE PES T&D Committee and SCC22 - Power Quality, 2000.

IEEE Std. 18-92, **IEEE Standard for Shunt Power Capacitors**, NY. 1992.

IEEE Std. 10-2002, **IEEE Standard for Shunt Power Capacitors**, NY. 2003.

IEEE Std. 1531-2003. **IEEE FOR APPLICATION AND SPECIFICATION OF HARMONIC FILTERS**. NY. 2003.

IRVING, M. R. AND, AL-OTHMAN, K. **“Admittance matrix models of three-phase transformers with various neutral grounding configurations”**. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 3, pp. 1210-1212, August 2003.

JAKKAPONG TUPSA-ARD, CHAIYA CHAMCHOY AND THAVATCHAI TAYJASANANT. **High-Voltage Passive Harmonic Filter Design. IEEE Electrical Power Systems Power Engineering and Power System**. Paper ID 1178. Electrical Engineering/Electronics, Computer. 8th International Conference on Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2011.

JI, JUNPENG. GUANG ZENG, HAIWA LIU, LEI LUO, JINGGANG ZHANG. **Research on Selection Method of Passive Power Filter Topologies**. 2012 IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia June 2-5, 2012, Harbin, China. ISBN 978-1-4577-2088-8/11/\$26.00 ©2012 IEEE.

JI, JUNPENG. 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.

KAWANN, C & EMANUEL, A. E. **“Passive Shunt Harmonic Filters for Low and Medium Voltage: A Cost Comparison Study”**. IEEE Transactions. on Power Systems. Vol. 11. No. 4, pp. 1825-1831. November 1996.

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.

KOVERNIKOVA¹, L.I. CHI, NGUYEN THANH². **An optimization approach to calculation of passive filter parameters based on particle swarm optimization**. European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality (EA4EPQ), International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12) Santiago de Compostela (Spain), 28th to 30th March, 2012. The Siberia Branch of the Russian Academy of Sciences Energy Systems Institute, Irkutsk (Russia) Phone: +7 3952 426495, fax: +7 3952 426796, e-mail: kovernikova@isem.sei.irk.ru, 2Irkutsk State Technical University Hanoi (Vietnam) nguyenchithanh@mail.ru.

LEITE, J.C. ABRIL, I. P., TOSTES, M. E. L., OLIVEIRA, R. C. L., **“Frequency scan on phase-coordinates frame for unbalanced systems”**. Electric Power Systems Research. Vol. 93, (2012), pp. 113–119.

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

LI, SHENGQING. YONGAN LI, 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.

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/\$26.00 ©2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronic, Bari/Italy. pp. 3273-3278. 2010.

_____. **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.

MOORTHY, S. AND HOADLEY, DAVID. “**A new phase-coordinate transformer model for bus analysis**”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 4, pp. 951-956, November 2002.

NA HE LINA HUANG AND XU, DIANGUO. **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.

NA HE, HUANG LINA, WU JIAN, XU DIANGUO. **Study on optimal design method for Passive Power Filters set at high voltage bus considering many practical aspects.** Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, CHINA E-mail: hena1012@hit.edu.cn, 978-1-4244-1874-9/08/\$25.00 ©2008 IEEE.

NA HE; XU DIANGUO AND LINA HUANG. **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.

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. WILSON XU AND WALMIR FREITAS. **An Investigation on the Selection of Filter Topologies for Passive Filter Applications.** IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 24, No. 3. July.2009.

NICOLAE, PETRE-MARIAN T. MANDACHE, LUCIAN N. NICOLAE ILEANA-DIANA V.D. NICOLAE. **The designing and simulation of passive filters used in urban transportation substations.** EUROCON 2009, EUROCON '09. IEEE. 18-23 May. 2009.

PANDI, V. RAVIKUMAR. 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/\$31.00 ©2012 IEEE.

PRAGALE RITCHIE, P.E., THOMAS J. DIONISE, P.E. DAVID D. SHIPP. **Harmonic analysis and multi-stage filter design for a large bleach production facility**. Electrical Transmission and Distribution Reference Book. Westinghouse Electric Corporation. Copyright Material IEEE, Paper No. PCIC-2010-47. 2010.

PHILIP E. C. STONE, JINGJIANG WANG, YONG-JUNE SHIN, AND ROGER A. DOUGAL. **Efficient Harmonic Filter Allocation in an Industrial Distribution System**. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 59, No. 2, February 2012.

PEREIRA COSTA, DULCE HELENA. Uma Abordagem Evolutiva Multiobjetivo para o Problema de Compensação de Energia Reativa em Redes de Distribuição de Energia Elétrica. Tese submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Universidade de Coimbra, 2011.

PROCEL, PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA **MANUAL DE TARIFAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA**, 1ª Edição - MAIO/2001

RUIHUA ZHANG, 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.

SCHAFFER, J.D. **“Some experiments in machine learning using vector evaluated genetic algorithms”**. Doctoral dissertation, Vanderbilt University, Electrical Engineering, Tennessee, 1984.

_____. **“Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms”**. Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms, 93-100, 1995.

SHARAF, ADEL M. EL-GAMMAL, ADEL A. A. EL-GAMMAL. **A Discrete Particle Swarm Optimization Technique (DPSO) For Power Filter Design**. ISBN978-1-4244-5750-2/10/\$26.00 ©2009 IEEE.

SHARAF, A.M.; EL-GAMMAL, A.A.A., **A Novel Discrete Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) of Optimal Shunt Power Filter**. Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE '09. IEEE/PES, ISBN 978-1-4244-3811-2/09/\$25.00 ©2009 IEEE.

SAINZ LUIS, MANUEL CARO AND JOAQUÍN PEDRA. **Steinmetz Circuit Influence on the Electric System Harmonic Response”**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 1143-1150, April 2005.

_____. **“Study of Electric System Harmonic Response”**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 2, pp. 868-874, April 2004.

SAINZ LUIS, MANUEL CARO. JOAQUÍN PEDRA AND SERGIO HERRAIZ. “**Capacitor and Shunt Filter Unbalance Influence on the Electric System Harmonic Response**”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 1522-1531, April 2005.

SRINIVAS, N. and K. DEB, “**Multiobjective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms**” in *Evolutionary Computing*, 2(3) pp. 221-238, 1993.

SHESHADRI, ARAVIND. **NSGA-II source code available in.** <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10429-nsga-ii-a-multi-objective-optimization-algorithm/content/NSGA-II/>. Acesso em 23 de outubro de 2012.

SHORT.T. A. **Electric power distribution handbook**. CRC Press 2004.

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

SMALL, STEVEN M. AND JEYASURYA BENJAMIN. **Multi-Objective Reactive Power Planning: A Pareto Optimization Approach**. International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, 2007. IEEE – ISAP. 2007.

SWARNKAR, ANIL. Nikhil GUPTA, NIAZI, K. R. **Optimal Placement of Fixed and Switched Shunt Capacitors for Large-Scale Distribution Systems using Genetic Algorithms Anil Swarnkar**. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 22. N°1, January, 2007.

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, pp. 452-465, January 1996.

TENG AU, MAU AND JOVICA V. MILANOVIC. **Planning Approaches for the Strategic Placement of Passive Harmonic Filters in Radial Distribution Networks**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, n°1. January. pp 347. 2007.

TOSTES. MARIA EMÍLIA DE LIMA. **Avaliação dos impactos causados pela geração de harmônicos na rede de distribuição em Consumidores em baixa tensão**. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará (ITEC-UFPA). 2003.

VARETSKY, YURIY. ZBIGNIEW HANZELKA. **Capacitor Bank Impact on Harmonic Filters Operation in Power Supply System**. 10th International Conference. Electrical Power Quality and Utilization, sept. 15-17. Lodz, Poland. 2009.

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.

WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION, Transmissão e Distribuição Elétrica Livro de Referência, 1964

ZOBAA, A.F. VACCARO, A. ZEINELDIN, H. H., LECCI. A. AND ABDEL MONEM, A.M. **Sizing of Passive Filters in Time-Varying Nonsinusoidal Environments.** 14th Conference International on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010. 978-1-4244-7245-1/10/\$26.00 ©2010 IEEE.

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

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

ZITZLER, E. & Thiele, L. **“An evolutionary algorithm for multiobjective optimization: The strength Pareto approach”.** Technical Report 33, Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK). Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, 1998.

ZITZLER, E. LAUMANN, M. & THIELE, L. **“SPEA 2: Improving the Strength Pareto evolutionary algorithm for multiobjective optimization”.** Proceedings of the EUROGEN 2001 – Evolutionary Methods for Design, Optimization and Control with Applications to Industrial Problems. K. C. Giannakoglou et al. (Eds.), 95-100, 2001.

APÊNDICES

APÊNDICE A

DADOS DO SISTEMA TESTE

No presente apêndice mostram-se os dados do sistema do exemplo utilizado pelo programa de otimização. Este sistema consiste de uma rede industrial com dois níveis de tensão em 4,16 kV e 480 V, cujas cargas são atendidas através de quatro transformadores, como mostra a Figura A.1.

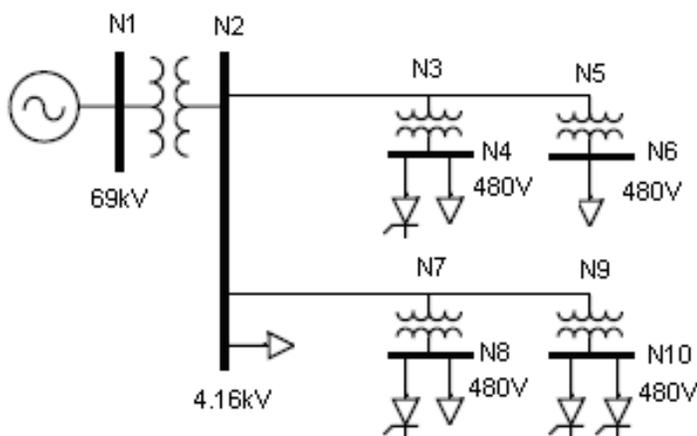


Figura A.1: Sistema Exemplo

Para modelar o sistema elétrico externo de 69 kV, é usada uma impedância série calculada para o nível de curto-circuito (MVAcc) e a razão x/r correspondente a cada um dos cinco cenários de operação considerados para o sistema (Tabela A.2).

Tabela A.2: Cenários para as análises

Parâmetro	Cenários				
	1	2	3	4	5
Duração diária do cenário (h/dia)	6	10	8	0	0
Depreciação da capacitância dos filtros $\Delta C(\%)$	0	0	0	0	10
Depreciação da indutância dos filtros $\Delta L(\%)$	0	0	0	-5	5
MVA de curto-circuito no PCC (MVA)	250	250	250	125	125

Os dados das conexões, tensões e impedância dos transformadores na tensão nominal são apresentados na Tabela A.3.

Tabela A.3: Dados dos transformadores

Transformador	Barra1	Barra2	Enrolamento	kV ₁	kV ₂	kVA	%R	%X
1	N1	N2	Δ-Y	69.0	4.16	7500	1.0	12.0
2	N3	N4	Δ-Y	4.16	0.48	1000	1.0	5.5
3	N5	N6	Δ-Y	4.16	0.48	1000	1.0	5.5
4	N7	N8	Δ-Y	4.16	0.48	1000	1.0	5.5
5	N9	N10	Δ-Y	4.16	0.48	1000	1.0	5.5

Os dados dos condutores primários de 4.16 kV são apresentados na Tabela A.4.

Tabela A.4: Dados de condutores*

Condutor	Barra1	Barra2	Espessura/bitola	Comprimento (m)
1	N2	N3	500 MCM	100
2	N3	N5	500 MCM	100
3	N2	N7	500 MCM	100
4	N7	N9	500 MCM	100

*5kV- três condutores blindado em condutor magnético

Como é apresentado na Tabela A.5, usa-se cabos trifásicos blindados com isolamento de 5kV.

Os dados das cargas lineares (kW e kVAr) em cada um dos cinco cenários analisados são apresentados na Tabela A.5.

Tabela A.5: Dados de cargas lineares*

Carga	Barra	Cenários									
		1		2		3		4		5	
		kW	kvar	kW	kvar	kW	kvar	kW	kvar	kW	kvar
1	N2	800	400	480	240	160	80	160	80	160	80
2	N4	280	140	224	112	84	42	84	42	84	42
3	N6	480	240	288	144	144	72	144	72	144	72
4	N8	420	210	252	126	0	0	0	0	0	0

Os dados da potência ativa e reativa da frequência fundamental e harmônica usados para as cargas não lineares nos cinco cenários apresentados na Tabela A. 6.

Tabela A.6: Dados das cargas não-lineares* (Tipo 1 e Tipo 2)

Carga	Barra	Tipo	Cenários									
			1		2		3		4		5	
			kW	kvar	kW	kvar	kW	kvar	kW	kvar	kW	kvar
1	N4	2	130	150	91	105	65	75	130	150	130	150
2	N8	2	65	75	45.5	52.5	26	30	65	75	65	75
3	N10	1	175	100	87.5	50	87.5	50	175	100	175	100
4	N10	2	112.5	130	67.5	78	56	65	112.5	130	112.5	130

*Os espectros harmônicos são mostrados nas Tabelas A.7, A.8

Os dados dos espectros de harmônicas: módulo e ângulo das correntes das três fases para cada harmônico são apresentados na Tabela A.6 para dois tipos espectro: Tipo 1 e Tipo 2.

Estes espectros de harmônicos foram obtidos utilizando o modelo de um retificador trifásico controlado no Matlab-Simulink, utilizando para o modelo do Tipo 1 com um ângulo de disparo de 30 graus e 50 graus para o Modelo do Tipo 2.

As correntes que aparecem na Tabela A.7 são dadas em percentagem da fase mais carregada à frequência fundamental.

Tabela A.7: Espectros harmônicos das cargas não-lineares

Ordem	Tipo 1					
	Correntes (%)			Ângulo (graus)		
	A	B	C	A	B	C
1	97.5	100.0	99.7	-40.4	-159.8	78.7
3	0.3	1.0	1.3	100.4	125.7	-60.4
5	20.8	20.2	20.3	-24.7	96.1	-145.8
7	7.7	8.3	8.4	-97.2	146.0	21.1
9	0.5	0.0	0.4	-2.3	154.9	179.0
11	3.9	3.6	3.5	-88.3	36.0	149.4
13	2.8	3.1	3.1	-162.6	80.8	-46.0
15	0.2	0.2	0.3	-75.6	-154.6	66.6
17	0.4	0.2	0.3	139.7	-92.8	1.3
19	0.5	0.6	0.5	122.8	-0.4	-127.6
21	0.1	0.1	0.2	97.8	152.6	-45.1

Tabela A.8: Espectro de harmônicos de cargas não-lineares (continuação)

Ordem	Tipo 2.					
	Correntes (%)			Ângulo (graus)		
	A	B	C	A	B	C
1	90.3	95.7	100.0	-49.9	-164.9	70.0
3	4.5	8.2	3.8	-78.9	109.9	-59.6
5	51.7	51.0	53.9	-60.1	56.6	177.6
7	23.6	25.3	24.0	21.5	-99.6	137.4
9	1.4	2.2	0.8	-144.9	29.5	-160.4
11	6.6	6.5	7.9	-154.4	-48.3	77.8
13	6.9	7.9	7.5	-80.9	159.5	32.8
15	0.8	1.2	0.4	130.2	-61.0	97.4
17	1.4	1.5	2.3	121.0	-165.8	-21.7
19	2.9	3.6	3.5	173.5	58.2	-73.7
21	0.5	0.7	0.3	45.7	-149.7	-4.1

Os dados da Tabela A.9 foram retirados do manual de tarifas da ANEEL.

Tabela A.9: Dados da fatura elétrica (ANEEL RES. 456, 2000).

Custo de demanda (\$/kW)	10.2
Custo de energia (\$/MWh)	25.7
Fator de potência mínimo	0.92

Para os dados dos custos de capacitores, reatores e resistores foram tomados como referência (C. Kawann and A. E. Emanuel, “Passive Shunt Harmonic Filters for Low and Medium Voltage: A Cost Comparison Study”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 4, pp. 1825-1831, November 1996), conforme são apresentados nas Tabelas A.10, A.11 e A.12.

Tabela A.10 Custos dos capacitores

480 V		4160 V	
kvar	\$/kvar	kvar	\$/kvar
25	19	50	15
50	17	100	14
		150	13

Tabela A.11: Custos dos reatores

480 V	4160 V
300 \$/kvar	250 \$/kvar

Tabela A.12: Custos dos resistores

480 V	4160 V
100 \$/kW	100 \$/kW

APÊNDICE B

(ARTIGOS PUBLICADOS RELACIONADOS À TESE)

ARTIGOS PUBLICADOS EM CONGRESSOS INTERNACIONAIS

1. BRITO JUNIOR, J. A.; LEITE, J.C. COSTA JUNIOR, C.T; TOSTES. M.E.L. **Lógica fuzzy aplicada ao estudo da qualidade de energia elétrica em um sistema com distorções harmônicas através do fator de potência.** Convencion Internacional de la ingenieria en Cuba. VI Conferencia de Ingeniería Mecánica, Eléctrica e Industrial. Havana, Cuba. CIIC - CIMEI 2010.
2. CIRINO, Weverson dos Santos. LEITE, J.C. COSTA JUNIOR, C.T; TOSTES. M.E.L. **Aplicação de Filtro Harmônico em Sistemas Elétricos de Baixa Tensão utilizando Lógica Fuzzy.** Convencion Internacional de la ingenieria en Cuba. VI Conferencia de Ingeniería Mecánica, Eléctrica e Industrial. Havana, Cuba. CIIC - CIMEI 2010.
3. GONÇALVES, B. P. LEITE, J.C. COSTA JUNIOR, C.T; TOSTES. M.E.L. **Aplicação de Filtro Harmônico em Sistemas Elétricos de Baixa Tensão utilizando Lógica Fuzzy.** Convencion Internacional de la ingenieria en Cuba. VI Conferencia de Ingeniería Mecánica, Eléctrica e Industrial. Havana, Cuba. CIIC - CIMEI 2010.
4. LEITE, J. C.; ABRIL, I. P.; TOSTES, M. E. L.; MEDEIROS, A. B. **Barrido de frecuencia en coordenadas de fase para sistemas desequilibrados.** In: XIV CONVENCION DE INGENIERIA ELÉCTRICA, 2011, CAYO DE SANTA MARIA - CUBA. XIV CONVENCION DE INGENIERIA ELÉCTRICA - CIE. Santa Clara - Villa Clara: UCLV, 2011. v. 1. p. 1-30-28.
5. LEITE, J. C.; ABRIL, I. P.; TOSTES. M. E. L. OLIVEIRA, R.C.L. **Optimización Multiobjetivos de Filtros Pasivos.** In: Sixth International Conference and Exhibition / Sexta Conferencia y Exhibición Internacional./ IEEE PES T&D LA 2012, Montevideo. Sixth International Conference and Exhibition / Sexta Conferencia y Exhibición Internacional. IEEE PES T&D LA 2012. Uruguay: <http://www.ieee-tdla.org>, 2012. v. 1. p. 1-30. 978-1-4673-2673-5/12/\$31.00 ©2012 IEEE.

ARTIGOS PUBLICADOS EM REVISTAS

6. LEITE, J. C.; ABRIL, I. P.; TOSTES. M. E. L. OLIVEIRA, R.C.L. **Frequency scan on a phase-coordinates frame for unbalanced systems.** Electric Power Systems Research 93 (2012) 113– 119. journal homepage: www.elsevier.com/locate/epsr. Revista QUALIS CAPES A1 ENGENHARIA IV.
7. ABRIL, I. PEREZ. LEITE, J.C. **Barrido de frecuencia en coordenadas de fase.** Revista Ingeniería Energética, No.3, Vol. XXXIII, pp. 196-204. Referenciada por: SciELO. 2012. Revista QUALIS CAPES B3 ENGENHARIA IV.
8. GONÇALVES, B. P. BRITO JUNIOR, A. J. LEITE, J. C. COSTA JUNIOR, C.T; TOSTES. M.E.L. **Avaliação de impactos harmônicos na rede elétrica através dos indicadores THD e Fator de Potência utilizando Lógica Fuzzy.** Revista Brasileira de Energia. Sociedade Brasileira de Planejamento Energético. UNIFEI-ITAJUBÁ. Minas Gerais. 2012. Revista QUALIS CAPES B4 ENGENHARIA IV.

ARTIGOS SUBMETIDOS

9. LEITE, J. C.; ABRIL, I. P.; TOSTES. M. E. L. OLIVEIRA, R.C.L. **Multi-objective optimization of passive filters in Industrial Power Systems.** Electrical Engineering (Berlin – PRINT). Powered by Editorial Manager® and Preprint Manager® from Aries Systems Corporation. Submetido em 2013. Revista QUALIS CAPES A2 ENGENHARIA IV.
10. AZEVEDO, M.S.S.; BEZERRA, U.H.; ABRIL, I. P.; BENITEZ, C.L.; LEITE, J.C. **Harmonic Propagation from the Low Voltage Four Wire Delta Systems.** Electrical Engineering (Berlin – PRINT). Powered by Editorial Manager® and Preprint Manager® from Aries Systems Corporation. Submetido em 2013. Revista QUALIS CAPES A2 ENGENHARIA IV.
11. LEITE, J. C.; 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. Submetido em 2013. Revista QUALIS CAPES A2 ENGENHARIA IV.
12. AZEVEDO, M.S.S. ABRIL, I. P. BENITEZ , C. A. De Leon. LEITE, J.C. BEZERRA, U.H. **Multiobjective Optimization of the Reactive Power Compensation in Electric Distribution.** Revista DYNA MEDELLIN. Submetido em 2013. Revista QUALIS CAPES A2 ENGENHARIA IV.