

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

**ALOCAÇÃO E DIMENSIONAMENTO MULTIOBJETIVO DE  
BANCOS DE CAPACITORES EM REDES DE  
DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO RESTRIÇÕES DE  
RESSONÂNCIA HARMÔNICA**

**Áthila Santos de Lima**

**DM 14/2017**

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2017



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

**Áthila Santos de Lima**

**ALOCAÇÃO E DIMENSIONAMENTO MULTIOBJETIVO DE  
BANCOS DE CAPACITORES EM REDES DE  
DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO RESTRIÇÕES DE  
RESSONÂNCIA HARMÔNICA**

**DM 17/2017**

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2017

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

**Áthila Santos de Lima**

**ALOCAÇÃO E DIMENSIONAMENTO MULTIOBJETIVO DE  
BANCOS DE CAPACITORES EM REDES DE  
DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO RESTRIÇÕES DE  
RESSONÂNCIA HARMÔNICA**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia Elétrica.

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2017

# FICHA CATALOGRAFICA

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

**ALOCAÇÃO E DIMENSIONAMENTO MULTI OBJETIVO DE BANCOS DE  
CAPACITORES EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO  
RESTRICÇÕES DE RESSONÂNCIA HARMÔNICA**

**Autor: Áthila Santos de Lima**

Dissertação de mestrado submetida à avaliação da banca examinadora aprovada pelo colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará e julgada adequada para obtenção do grau de mestre em engenharia elétrica na área de sistemas de energia

APROVADA EM \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Emília de Lima Tostes**  
Orientadora (PPGEE/UFPA)

---

**Prof<sup>o</sup>. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra**  
Co-Orientador (PPGEE/UFPA)

---

**Prof<sup>o</sup>. Dr. João Paulo Abreu Vieira**  
Examinador Interno (PPGEE/UFPA)

---

**Prof<sup>a</sup>. Dra. Carminda Célia Moura de Carvalho**  
Examinadora Externa

---

**Prof<sup>o</sup>. Dr. Filipe de Oliveira Saraiva**  
Examinador Externo

**Visto:**

---

**Prof<sup>o</sup>. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes**  
Coordenador do PPGEE - ITEC/UFPA

## **DEDICATÓRIA**

É com muito orgulho que dedico este trabalho a Deus, meus pais e a minha sobrinha Julia que muito tem alegrado nossas vidas.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por tudo e por permitir essa vitória na vida acadêmica.

Agradeço os meus pais e irmã, pois foram meu alicerce no começo de tudo.

Agradeço aos meus primos pelo tempo que passamos juntos e em especial a Kesia e a Kaylane.

Agradeço a minha orientadora, professora Maria Emília, pela credibilidade e confiança que foi depositada novamente a mim.

Agradeço os professores Ubiratan Bezerra e João Paulo Vieira pois sempre esclareceram minhas dúvidas e contribuíram enormemente para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a minha equipe, colegas de trabalho e amigos: José Henrique e Vitor Kataoka, pois, além de sua extrema competência, são excelentes companheiros.

Agradeço a equipe do CEAMAZON por fazer deste centro um local maravilhoso para o trabalho.

Agradeço a Universidade Federal Rural da Amazônia que me cederam e recursos físicos e financeiros para que este trabalho foi realizado.

Agradeço a Companhia de Eletricidade do Amapá, CEA, pelo apoio a esta pesquisa.

Enfim, agradeço todos que de forma direta ou indireta contribuíram e contribuem para meu sucesso.

## EPÍGRAFE

“As pessoas podem fazer seus planos, porém é o SENHOR Deus quem dá a última palavra.” (Pv 16:1)

## Resumo

As mudanças a que o setor elétrico tem sido submetido ao longo das últimas décadas vêm impondo às concessionárias e permissionárias novos desafios, os quais tem impulsionado pesquisas na busca de melhorias ao sistema de distribuição sem abrir mão do emprego ótimo de recursos. As adequações à normatização que regula o setor, a constante busca pela redução nas perdas, a crescente demanda e a inserção de novos paradigmas, como por exemplo, a geração distribuída, têm sido tópicos amplamente estudados. O uso de Bancos de Capacitores (BCs) devidamente alocados vem constituindo, por muito tempo, uma das principais estratégias utilizadas para manter variáveis elétricas tais como tensão, fator de potência e carregamento de alimentadores dentro dos níveis adequados. Por outro lado, a crescente presença de harmônicos na rede acrescenta limitações no uso dessa estratégia. Nesse contexto, este trabalho propõe o emprego do NSGA-II, uma metaheurística multiobjetivo, na solução do Problema de Alocação de Bancos de Capacitores (PABC) em redes de distribuição radiais trifásicas, considerando os fenômenos da ressonância harmônicas devidos a presença de cargas não-lineares. A abordagem multiobjetivo permite ao usuário escolher entre uma gama de soluções a que mais se adequa às suas necessidades. Os resultados evidenciaram grande relevância da análise da distorção harmônica e do índice de ressonância, em conjunto, para a obtenção de soluções otimizadas para o PABC, de forma a elevar a qualidade da energia entregue ao consumidor e a vida útil dos equipamentos que constituem a rede de distribuição.

Palavras-chave: alocação ótima de bancos de capacitores; bancos de capacitores; metaheurísticas multiobjetivo; NSGA-II; ressonância harmônica.

## **Abstract**

The changes the electric sector has undergone over the last decades have imposed new challenges to the utility companies, which have driven researches for improvements in the distribution system without giving up the optimal use of resources. The adequacy to sector regulations, constant search for reduction in losses, increasing demand and the insertion of new paradigms, such as distributed generation, have been widely studied topics. The use of properly allocated Capacitor Banks has long been one of the main strategies used to maintain electrical variables such as voltage, power factor and feeder loading within the appropriate levels. On the other hand, the increasing presence of harmonics in the network adds limitations to this strategy. In this context, this work proposes the use of NSGA-II, a multiobjective metaheuristic, in solving the Problem of Capacitor Banks Allocation in three-phase radial distribution networks, considering harmonic resonance phenomena due to the presence of nonlinear loads. The multiobjective approach allows the user to choose from a range of solutions, one that best suits their needs. The results showed great relevance of harmonic distortion and resonance index analysis to obtain optimized solutions for the allocation problem, allowing increased quality of the energy delivered to the consumer and lifespan of the equipments that constitute the distribution network.

**Keywords:** capacitor banks; harmonic resonance; optimal capacitor bank allocation; multiobjective metaheuristics; NSGA-II;

# Sumário

Sumário .....	xii
Lista de Figuras.....	xvi
Lista de Tabelas .....	xix
Lista de Símbolos e Abreviaturas .....	xx
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Os problemas de ressonância harmônica em bancos de capacitores.....	1
1.2. Objetivos gerais e específicos.....	9
1.3. Organização do trabalho.....	9
<b>CAPÍTULO 2. BANCOS DE CAPACITORES EM SISTEMAS DE POTÊNCIA.....</b>	<b>11</b>
2.1. Introdução .....	11
2.2. Aspectos construtivos.....	11
2.3. Degradação de Bancos de Capacitores.....	13
2.3.1. Efeito da degradação das bordas dos eletrodos .....	14
2.3.2. Efeitos da temperatura .....	15
2.3.3. Efeito da umidade .....	16
2.4. Falhas de capacitores em sistemas de potência. ....	17
2.5. Ressonância harmônica em bancos de capacitores .....	19
2.5.1. Ressonância Série .....	19
2.5.2. Ressonância Paralela .....	19
2.6. Ferramentas de Análise de Ressonância Harmônica.....	20
2.6.1. Varredura de Frequências (Frequency Scan) .....	20
2.6.2. Índice de Ressonância (RI).....	21
2.7. Conclusões .....	23
<b>CAPÍTULO 3. OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO USANDO ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS</b>	<b>25</b>
3.1. Introdução .....	25
3.2. Otimização .....	26
3.3. Algoritmo Evolutivo para Problemas de Otimização Mono-objetivo.....	26
3.3.1. Cromossomo .....	27
3.3.2. Aptidão .....	28

3.3.3.	Seleção.....	28
3.3.4.	Operadores Genéticos .....	29
3.3.5.	Elitismo .....	31
3.4.	Problemas de Otimização Multiobjetivo.....	31
3.4.1.	Otimalidade de Pareto.....	32
3.4.2.	Dominância .....	33
3.4.3.	Decisão .....	36
3.5.	Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II).....	36
3.5.1.	Distância de Multidão.....	37
3.5.2.	Determinação da nova população .....	38
3.6.	Conclusões .....	40
<b>CAPÍTULO 4. PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO PARA ALOCAÇÃO DE BANCOS DE</b>		
<b>CAPACITORES PELO NSGA-II .....</b>		
		<b>41</b>
4.1.	Introdução .....	41
4.2.	Problema de Alocação de Banco de Capacitores sob a ótica MO .....	41
4.3.	Factibilidade das soluções.....	48
4.3.1.	Cenário 01 .....	48
4.3.2.	Cenário 02.....	49
4.3.3.	Cenário 03.....	50
4.4.	Solução através do NSGA-II proposto .....	50
4.4.1.	Algoritmo genético proposto .....	50
4.4.1.1.	Codificação.....	51
4.4.1.2.	Geração da população inicial .....	52
4.4.1.3.	Seleção.....	53
4.4.1.4.	Cruzamento.....	53
4.4.1.5.	Mutação.....	54
4.4.2.	Ordenação por Dominância: .....	55
4.4.3.	Elitismo para as soluções não-dominadas.....	56
4.4.4.	Distância de Multidão.....	57
4.4.5.	Convergência.....	58
4.4.6.	Pseudocódigo Algoritmo do NSGA-II .....	58
4.5.	Conclusões .....	59
<b>CAPÍTULO 5. METODOLOGIA E RESULTADOS.....</b>		
		<b>60</b>
5.1.	Introdução .....	60

5.2.	Sistema de Teste .....	60
5.3.	Parâmetros comuns.....	61
5.4.	Algoritmo Principal.....	63
5.5.	Cenário 1: Inclusão das restrições de THD ao PABC.....	65
5.5.1.	Metodologia proposta para avaliação de Distorções Harmônicas ao PABC .....	65
5.5.2.	Estatísticas da simulação do Cenário 01.....	66
5.5.3.	Resultado da simulação do cenário 01.....	67
5.5.4.	Análise da formação do gap do Cenário 01 .....	68
5.5.5.	Análise de uma solução da Fronteira do Cenário 01 .....	69
5.5.6.	Análise do espaço dos objetivos para o Cenário 01 .....	71
5.5.7.	Ocorrência de ressonância e amplificação de tensão harmônica: Cenário 01 .....	73
5.5.8.	Análise do Cenário 01 x Índice de ressonância .....	76
5.5.9.	Considerações Finais do Cenário 01.....	78
5.6.	Cenário 2: Inclusão das restrições de índice de ressonância ao PABC.....	78
5.6.1.	Introdução .....	78
5.6.2.	Metodologia proposta para avaliação de Distorções Harmônicas ao PABC .....	79
5.6.3.	Inicialização da população inicial do Cenário 02.....	81
5.6.4.	Estatísticas da simulação do Cenário 02.....	81
5.6.5.	Resultado da simulação do Cenário 02 .....	82
5.6.6.	Análise da formação do gap do Cenário 02 .....	82
5.6.7.	Análise de uma solução da Fronteira do Cenário 02 .....	84
5.6.8.	Análise de convergência cenário 02.....	85
5.6.9.	Ocorrência de ressonância e amplificação de tensão harmônica: Cenário 02 .....	88
5.6.10.	Análise do Cenário 02 x Restrições harmônicas.....	91
5.6.11.	Considerações finais: .....	94
5.7.	Cenário 3: Inclusão das restrições de THD, IHD e RI ao PABC.....	95
5.7.1.	Inicialização da população inicial para o Cenário 03 .....	95
5.7.2.	Estatísticas da simulação do Cenário 03.....	96
5.7.3.	Resultado da simulação do cenário 03.....	97
5.7.4.	Análise da formação do gap do Cenário 03 .....	97
5.7.5.	Análise de uma solução da Fronteira do Cenário 03. ....	98
5.7.6.	Análise de convergência cenário 03.....	99
5.7.7.	Considerações finais: .....	101
5.8.	Conclusões .....	102

<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>103</b>
<b>6.1. Considerações finais .....</b>	<b>103</b>
<b>6.2. Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>105</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>107</b>
<b>APÊNDICE A – DADOS E RESULTADOS DO SISTEMA 34 BARRAS .....</b>	<b>113</b>
<b>APÊNDICE B – Divulgação da pesquisa .....</b>	<b>116</b>

## Lista de Figuras

Figura 2-1: Células capacitivas de média tensão de diferentes potências nominais .....	12
Figura 2-2: Banco de Capacitores Trifásico instalados em RDU.....	12
Figura 2-3: Efeito das bordas de eletrodos no material dielétrico. ....	14
Figura 2-4: Função $\varphi(C)$ para o cálculo da tensão de ruptura térmica de um dielétrico .....	16
Figura 2-5: Dependência da umidade do material isolante com a temperatura.....	17
Figura 2-6: Estresse dielétrico versus tempo de vida do isolante de um capacitor de potência. .....	18
Figura 2-7: Análise da varredura de frequências para um sistema de 3 barras. ....	21
Figura 2-8: Curva do RI considerando o 5° e 7° harmônicos .....	23
Figura 3-1: Representação inteira para o cromossomo de um AG aplicado ao PADBC .....	28
Figura 3-2: Representação binária para o cromossomo de um AG aplicado ao PADBC .....	28
Figura 3-3: Exemplo de cruzamento para cromossomos de representação binária.....	29
Figura 3-4: Exemplo de mutação em um cromossomo de representação binária .....	30
Figura 3-5: Fronteira de Pareto para o paradoxo velocidade X energia .....	33
Figura 3-6: Conjunto de Pareto-ótimos em relação a otimização dos objetivos .....	34
Figura 3-7: Soluções Pareto-ótimas locais e globais .....	35
Figura 3-8: Ilustração do conceito de dominância de Pareto para minimização das duas funções objetivos. ....	35
Figura 3-9: Formação das Fronteiras durante o NSGA-II.....	37
Figura 3-10: Representação gráfica da distância de multidão.....	38
Figura 3-11: Constituição da nova população para o NSGA-II .....	38
Figura 3-12: Fluxograma do NSGA-II. ....	39

Figura 4-1: Modelo genérico de linha usado no método do somatório de correntes.....	45
Figura 4-2: Vetor de codificação de uma solução do algoritmo genético .....	52
Figura 4-3: Algoritmo para a ordenação por dominância do NSGA-II.....	56
Figura 4-4: Algoritmo para o cálculo da distância de multidão .....	57
Figura 4-5: Algoritmo do NSGA-II proposto.....	58
Figura 5-1: Representação do sistema utilizado nas simulações .....	61
Figura 5-2: Representação binária do cromossomo .....	62
Figura 5-3: Fluxograma da implementação computacional do problema .....	64
Figura 5-4: Fronteira de Pareto para o Cenário 01 .....	68
Figura 5-5: Gap formado na Fronteira de Pareto.....	69
Figura 5-6: Conteúdo harmônico detalhado da Solução A do Cenário 01 em cada barra. ....	71
Figura 5-7: Front de Pareto e violações para o Cenário 1 .....	72
Figura 5-8: Análise em detalhe da fronteira de Pareto do Cenário 1. ....	73
Figura 5-9: Violações processadas na simulação do cenário 01 .....	74
Figura 5-10: Conteúdo harmônico detalhado da Solução B do Cenário 01 em cada barra.....	76
Figura 5-11: Cenário 01 com as soluções processadas que violaram o RI.....	77
Figura 5-12: Solução do Cenário 01 x índice de Ressonância .....	78
Figura 5-13: Fronteira de Pareto para o Cenário 02 .....	83
Figura 5-14: Violação do RI em conjunto com as soluções factíveis .....	83
Figura 5-15: Conteúdo harmônico detalhado da solução do Cenário 02 .....	85
Figura 5-16: Soluções dos cenários 01 e 02 .....	86
Figura 5-17: Pareto local obtido no espaço dos objetivos para o cenário 02 .....	88
Figura 5-18: Violações Processadas na simulação do cenário 01 .....	89

Figura 5-19: Cenário 02 com as soluções processadas que violaram os limites para $THD_v$ e $IHD_v$ .....	91
Figura 5-20: Ampliação da primeira região da fronteira de Pareto onde ocorre as Violação de distorção harmônicas. ....	92
Figura 5-21: Conteúdo harmônico detalhado da Solução E do Cenário 02 em cada barra .....	94
Figura 5-22: Fronteira de Pareto para o Cenário 03 .....	97
Figura 5-23: Violação do RI em conjunto com as soluções factíveis .....	98
Figura 5-24: Soluções dos cenários 01, 02 e 03 .....	99
Figura 5-25: Pareto local obtido no espaço dos objetivos para o cenário 03 .....	100
Figura 5-26: Conteúdo harmônico detalhado de uma solução .....	101

## Lista de Tabelas

Tabela 4-1: Configurações e preços dos bancos de capacitores considerados .....	42
Tabela 4-2: Características das cargas não lineares.....	46
Tabela 4-3: Configurações e custos dos bancos de capacitores considerados .....	51
Tabela 5-1: Informações registradas nos programas .....	62
Tabela 5-2: Estatísticas da simulação do Cenário 01 .....	67
Tabela 5-3: Resultados para a Solução A.....	70
Tabela 5-4: Resultados para a Solução B .....	75
Tabela 5-5: Limites operacionais dos capacitores de potência segundo IEEE 1036 – 2010....	79
Tabela 5-6: Estatísticas da simulação do Cenário 02 .....	81
Tabela 5-7: Resultados para a Solução C .....	84
Tabela 5-8: Inserção da Análise de RI na solução A.....	87
Tabela 5-9: Resultados para a Solução D.....	90
Tabela 5-10: Análise da Solução E.....	93
Tabela 5-11: Estatísticas da simulação do Cenário 03 .....	96

## Lista de Símbolos e Abreviaturas

AG:	Algoritmos Genéticos.
AIEE:	Instituto Americano de Engenharia Elétrica.
BC:	Bancos de Capacitores.
GRASP:	<i>GreedRandomizedAdaptiveSearch Procedure.</i>
HM:	Harmony Memory.
HSA:	Algoritmo de Busca Harmônica.
IEEE:	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers.</i>
IHD:	Distorção Harmônica Individual.
MO:	Multiobjetivo.
NSGA:	<i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm.</i>
OLTC:	<i>On Load Tap Changer.</i>
PABC:	Problema de Alocação de Bancos de Capacitores.
PAC:	Ponto de Acoplamento Comum
PRODIST:	Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PSO:	Otimização por Enxame de Partículas.
p.u:	Por Unidade
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RI:	Índice de Ressonância.
RMS:	Raiz Média Quadrática.
RDU:	Rede de Distribuição Urbana
SPEA:	<i>Strength Pareto Evolutionary Algorithm.</i>
TIDP:	Tensão de Incepção de Descargas Parciais.

THD: Distorção Harmônica Total.

# CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Os problemas de ressonância harmônica em bancos de capacitores

O crescimento de cargas não lineares impôs novos desafios às concessionárias de distribuição de energia elétrica, principalmente no que tange a manutenção da forma de onda oferecida aos seus clientes.

Conforme salienta DUGAN (2000), os harmônicos são nocivos aos elementos mais comuns presentes nas redes de distribuição sujeitando-os aos mais diversificados efeitos: em motores elétricos, o rendimento fica comprometido por conta do torque contrário proporcionado pelas frequências harmônicas; em transformadores, aumentam as perdas no ferro; nos cabos de alimentação, causam o efeito pelicular e restringem a aplicação dos mesmos em projetos elétricos; em elementos de proteção em geral, podem causar mau funcionamento e atuações indesejadas.

Um estudo estatístico realizado pelo Instituto Americano de Engenharia Elétrica (AIEE) em 1949, elencou as principais causas de falhas em bancos de capacitores instalados em sistemas de potência. Foi apontado que 60% das falhas causadas por sobretensão ocorreram em menos de 1 ano de instalação dos bancos de capacitores. Um segundo quesito avaliado pelo mesmo grupo de estudos apontou que outra causa relevante na falha e até mesmo perda de bancos de capacitores de forma precoce seria a forma de onda da tensão. O resultado do estudo revelou que 100 % dos bancos instalados apresentaram problemas de funcionamento em menos de um ano de uso.

DUGAN *et al* (2012) também relata que nos Estados Unidos 20% das instalações industriais nas quais não foi realizado nenhum estudo e simulação do comportamento do sistema, houve sérios problemas operacionais envolvendo interrupção de processos ou falha de equipamentos devido à ressonância harmônica.

No caso de bancos de capacitores, as frequências harmônicas podem levar o sistema a um estado de ressonância, elevando a amplitude de determinado componente harmônico e, conseqüentemente, o nível de distorção da rede. De forma geral, a situação de ressonância harmônica é alcançada quando as reatâncias capacitiva e indutiva da rede em um determinado ponto se equivalem. Não é difícil encontrar nas redes de distribuição de energia elétrica arranjos

que favoreçam a ocorrência de ressonâncias harmônicas. Mais detalhes sobre a ressonância harmônica serão discutidos nos itens 2.5 e 2.6.

Os métodos para determinar a ocorrência de ressonância harmônica são baseados na relação entre o nível de falhas do sistema e o valor nominal do capacitor existente no barramento em análise. Os resultados desses métodos não permitem, entretanto, avaliar quantitativamente o nível de ressonância, principalmente em situações em que a ocorrência do fenômeno era amortecida pela resistência equivalente do sistema. Baseado nesses fatos, XU *et al* (2001) propôs um método de quantificar o nível de severidade harmônica através dos limites de grandezas elétricas (tensão, corrente e potência) propostos para os bancos de capacitores a partir da violação de tais limites haveria danos nos mesmos. Essa abordagem possibilitou a avaliação mais precisa da ressonância harmônica criando novos parâmetros na mitigação das distorções.

O trabalho de HUANG *et al* (2003) deu continuidade ao trabalho de XU *et al* (2001), onde os limites propostos pela Norma IEEE 1036 são usados para traçar um conjunto de gráficos chamados pelos autores de Carta de Ressonância. Na Carta de Ressonância é avaliada a relação entre a impedância na frequência harmônica e a impedância na frequência fundamental, denominada índice de ressonância harmônica. Caso o índice de ressonância harmônica leve a uma região da Carta tida como não confiável, o banco de capacitores a ser instalado certamente causará ressonância em níveis que o prejudicarão. Em contrapartida, se a análise levar à região confiável, significa que o banco pode ser instalado conforme o projeto.

SILVA (2004) utiliza o índice e a Carta de Ressonância vistos no trabalho anterior como ferramentas de um software que auxilia o dimensionamento e alocação de bancos de capacitores em redes de distribuição. Para validação de seu Programa, o autor analisou a ressonância em um ambiente fabril e também na rede de distribuição da concessionária.

MCGRANAGHAN *et al* (2007) mostra que a ressonância harmônica pode também acontecer de forma severa na subestação de distribuição e na própria rede. Na busca por compensação reativa e manutenção dos níveis de tensão em valores desejados nos barramentos distantes da subestação, a instalação dos bancos de capacitores é realizada sem, contudo, verificar-se a existência de cargas não lineares que possam produzir frequências que provoquem a ressonância harmônica. Nesse sentido, os autores constataram a ressonância harmônica tanto na subestação quanto na rede de distribuição em diferentes níveis segundo o valor nominal do capacitor instalado.

Para exemplificar o impacto da ressonância harmônica em indústrias, cita-se o trabalho de MANITO (2009) no qual é mostrada uma análise completa dos principais fenômenos de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) em uma indústria de alumínio. Sob a luz da Norma IEEE 519, o autor propõe o uso da ferramenta de análise de lugar geométrico para mapear as impedâncias na ordem harmônica desejada e, dessa forma, avaliar as condições de amplificações e ressonâncias harmônicas.

Percebe-se, portanto, que o Problema de Alocação de Banco de Capacitores (PABC) deve ser analisado sob este novo ponto de vista, qual seja, a integração das cargas não lineares juntamente com seus efeitos. Encontram-se na literatura diversas propostas para resolver o problema de alocação e dimensionamento ótimo de bancos de capacitores considerando a ressonância harmônica.

Como exemplo, cita-se o trabalho de EAJAL e HAWARY (2010), que já atentam para o problema de ressonância causado pela inserção de banco de capacitores, quando o mesmo faz-se sem considerar a presença de cargas não-lineares conectadas à rede de distribuição. A função objetivo desse trabalho mostra a dependência sumária das perdas reais totais e do custo para implantação de um banco de capacitores em um determinado barramento. As perdas totais, por sua vez, são compostas pelas perdas na componente fundamental e as perdas nas componentes harmônicas. Os critérios de desigualdade compreendem os limites de tensão nas barras, de distorção harmônica total máxima (THD) em cada barra, o número e os valores nominais relacionados aos bancos de capacitores a serem instalados. A meta-heurística utilizada combina o Método do Enxame de Partículas em sua forma discreta com o algoritmo de Fluxo de Carga Trifásico. É realizada uma verificação na rede. Certificando-se da existência dos harmônicos, o passo seguinte seria executar o fluxo de carga harmônico o qual é considerado no algoritmo de otimização seja pelo critério direto dos limites de THD seja pela composição das perdas referente aos componentes harmônicos.

Conforme visto, o trabalho anteriormente citado considera o problema de alocação de bancos de capacitores representado por uma função objetivo única a ser otimizada. Em outro caso de objetivo único, MUTHUKUMAR e JAYLHALYTA (2012) segue uma proposta semelhante àquela proposta por EAJAL e HAWARY (2010) no que tange à escolha da função objetivo e a determinação do fluxograma, o qual segue com a simulação do fluxo de carga para redes de distribuição não radiais e o fluxo de carga harmônico desta mesma rede. Outra similaridade com o trabalho supracitado é a escolha do sistema 13 barras do IEEE, bem como

a proposta dos mesmos casos estudados por EAJAL e HAWARY (2010) (caso 1, caso 2 e caso 3). No lugar da Otimização por Enxame de Partículas (PSO), utilizam o Algoritmo de Busca Harmônica (HSA), o qual recebe este nome devido a similaridade com um grupo de músicos (população) que harmonicamente se reúnem em torno de uma orquestra (solução global). O algoritmo se desenvolve basicamente em 5 passos: 1) identificação dos parâmetros da rede e a escolha dos critérios de parada, tamanho do passo e o tamanho da matriz *harmony memory* (HM); 2) Geração das soluções da matriz HM obtidas de forma randômica; 3) improvisação de uma nova harmonia (atualização dos parâmetros do método); 4) geração de uma nova HM; 5) os passos 3 e 4 são repetidos até que o critério de parada seja atendido. Os resultados evidenciam a melhora significativa na redução de perdas com a instalação de banco de capacitores. Quando os harmônicos são considerados, no entanto, embora as perdas sejam um pouco maiores, o nível de THD é muito menor se comparado à instalação dos Bancos de Capacitores (BC's) sem a apreciação da composição harmônica presente.

Como a maioria dos problemas reais envolvem a otimização de mais de um objetivo buscando controlar outras variáveis em faixas adequadas de operação, o PABC também é abordado por seu viés multiobjetivo (MO). A maioria dos trabalhos encontrados faz referência à otimização das tensões nas barras e das perdas ativas nas linhas em duas abordagens distintas. A primeira refere-se à obtenção da função objetivo composta pelos objetivos específicos considerados no problema devidamente ponderados. Neste sentido está o trabalho de BEE (2007), que apresenta uma proposta de abordagem do problema que utiliza algoritmos genéticos e considera uma única função objetivo composta por várias parcelas, as quais representam objetivos específicos do problema e que são ponderadas a fim de diminuir discrepâncias na avaliação da função objetivo como um todo. Embora o autor defenda a perspectiva MO a qual o problema merece, ele não usa nenhuma técnica de otimização para múltiplos objetivos. Em sua análise, não são considerados sistemas desbalanceados nem tampouco a presença de cargas não-lineares.

Da mesma forma como o trabalho anterior, FONSECA *et al* (2010), propôs o uso do algoritmo genético para a alocação de uma quantidade definida de reativos em uma rede de distribuição radial composta por 222 barras, em que cada uma representa um dos transformadores de determinada área da Cidade de Belém do Pará. Além das perdas, que é a parcela comumente encontrada como objetivo do problema de alocação de bancos de capacitores, outras duas parcelas fazem parte da função objetivo, quais sejam, os níveis de tensão nas barras e o custo associado ao investimento nos bancos de capacitores e na estrutura

necessária para alocá-los. O trabalho faz uma análise de dois cenários. O primeiro deles refere-se ao uso dos bancos somente para manter os níveis das tensões nas barras dentro dos níveis aceitáveis. Já a segunda abordagem, refere-se à otimização dos três objetivos conjuntamente, daí os autores defenderem sua proposta como sendo uma estratégia MO.

A segunda forma de tratamento MO para o problema abrange o entendimento da Fronteira Ótima de Pareto, formada por todos os pontos não dominados quando confrontados suas métricas nos objetivos individuais. A Fronteira Ótima de Pareto, conceito que é melhor abordado mais a frente, tem seus pontos nas extremidades da região factível para o problema. Para problemas que não se conhece a forma analítica, tal como o considerado neste trabalho, o resultado da busca no espaço multiobjetivo acaba sendo uma aproximação da Fronteira Ótima de Pareto. Os trabalhos que seguem trazem esses conceitos nos seus desenvolvimentos.

PEREIRA JUNIOR (2009) propõe a abordagem multiobjetivo para o problema de alocação ótima de bancos de capacitores fixos e chaveados em sistemas de distribuição radiais sem, contudo, dar ênfase aos harmônicos presentes na rede. O autor utiliza os métodos multiobjetivos *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA), NSGA-II e Busca Tabu Multiobjetivo, comparando-os entre si e também com os resultados encontrados na literatura. Adicionada ao problema, a inserção de geração distribuída a qual torna o problema ainda mais complexo, haja vista a mudança de topologia de um sistema que pode deixar de ser radial e passar a ser um sistema malhado.

SOUZA e ALMEIDA (2010) utilizam a Lógica Fuzzy para aprimorar a otimização do problema multiobjetivo de alocação de bancos de capacitores e reguladores de tensão em sistemas radiais visando o controle de tensão nas barras e do fluxo de reativos do sistema (no caso de bancos de capacitores). Os autores salientam o fato do problema ser combinatório e multiobjetivo, cabendo a todos os objetivos considerados a mesma importância. A estratégia multiobjetivo utilizada é o *Strength Pareto Evolutionary Algorithm* (SPEA2). O conjunto de regras Fuzzy tem como variáveis lingüísticas de entrada a faixa de operação e a potência dos reguladores de tensão e a saída é um índice normalizado, o qual será utilizado no algoritmo multiobjetivo.

Trabalhos como o de SEHIEMY *et al* (2013) e de FARD e NIKNAM (2014), também utilizam as abordagens multiobjetivos juntamente com o auxílio da Teoria de Conjuntos Fuzzy para resolver problemas dos sistemas de potência, principalmente aqueles relacionados ao despacho ótimo de potência reativa, e; de confiabilidade e segurança nos sistemas de potência.

Como um exemplo de aplicação multiobjetivo para o mesmo problema, SALAS *et al* (2012) enfatizaram novamente a necessidade de se considerar a presença de cargas não lineares bem como de seus efeitos na determinação da solução ótima do problema da alocação e dimensionamento de BC's. Em seu trabalho, utiliza-se uma abordagem multiobjetivo pautada na técnica de otimização NSGA II, cujas principais características são a ordenação por não-dominância e a manutenção da diversidade através do cálculo de distância de multidão. As funções objetivos são traçadas de forma a evidenciar o impacto da instalação dos BC's na redução das perdas técnicas e da manutenção dos níveis de tensão. Além disso, ressalta-se que as restrições de desigualdade trazem índices de ressonância harmônica, conforme os limites estabelecidos pela norma IEEE 1036/2010, e como os efeitos da ressonância harmônica afetam diretamente a vida útil dos BC's. Outras restrições afetadas pela presença de harmônicos no sistema e utilizadas para deduzir a região factível são a máxima variação de tensão nas barras e o nível de distorção harmônica, esta última baseada na Norma IEEE 519. Os testes são realizados utilizando um sistema de 69 barras, considerando o carregamento leve e médio do sistema. Os resultados evidenciam a amplificação, em alguns casos, da 5ª e 7ª componentes harmônicas, que imediatamente são rechaçadas devido ao critério ligado ao nível de ressonância. É feita a variação da penetração harmônica para evidenciar as mudanças nos resultados, segundo a IEEE 519.

Novamente o NSGA-II é usado como técnica de otimização multiobjetivo, desta vez no trabalho de PIRES *et al* (2012), em que a busca local é usada para aprimorar o algoritmo, comparando os resultados obtidos com os do NSGA-II simples. Os bancos de capacitores a serem instalados em um sistema real de 94 barras são em um total de 8 tipos, diferenciados pelo valor nominal e pelo seu respectivo preço no mercado. As duas funções objetivos consideradas no problema são referentes às perdas ativas no sistema e o custo associado aos bancos de capacitores fixos e chaveados. Além dos dois objetivos, o problema ainda traz como restrições de desigualdade a manutenção da tensão dentro de um nível aceitável e a viabilidade técnica de instalação de bancos de capacitores em uma determinada barra. A busca local torna-se determinante no algoritmo quando, a um determinado cromossomo da fronteira de Pareto, realiza-se uma mudança em um de seus alelos mantendo os demais na forma original. As soluções vizinhas são então analisadas, buscando-se uma configuração factível e mais atrativa. Os resultados apontam uma melhoria na fronteira de Pareto quando comparada ao NSGA II clássico.

AZIMI e ESMAEILI (2013) em mais um trabalho de abordagem multiobjetiva do controle de tensão e reativos (Volt/var) em sistemas de distribuição tratam a redução de perdas no sistema, os níveis de tensão nas barras e também a mitigação da flutuação de tensão durante o dia. Para isso, são utilizados OLTC's (*on load tap changer*) e bancos de capacitores ao longo da rede de distribuição. Eles utilizam a técnica de otimização Colônia de Formigas, a qual possui uma excelente performance com problemas combinatórios uma vez que trabalha com a concepção de grafos. A função objetivo é composta por tantas parcelas ponderadas quantos são os objetivos individuais considerados no trabalho. É interessante observar, que além das restrições de desigualdade comumente consideradas nos trabalhos que tratam do assunto, são inseridas condições que consideram o número máximo de mudanças do *tap* dos reguladores bem como o número máximo de chaveamentos de bancos de capacitores. Os sistemas utilizados para testes foram o IEEE 33 barras e o IEEE 69 barras, ambos modificados.

AZEVEDO *et al* (2013) passam a incluir como um dos objetivos do problema a distorção harmônica total, a qual deve ser minimizada ao longo de todo o sistema. O segundo objetivo, em se tratando de planejamento, é a economia anual com a implantação dos bancos de capacitores, objetivo este, que já inclui o custo dos bancos de capacitores a serem instalados. As restrições levam em consideração os limites estabelecidos pelas normas vigentes tanto para os níveis de tensão RMS quanto para os níveis de THD. Os resultados obtidos constataram a mudança de paradigmas no que se refere a considerar ou não a presença de harmônicos na análise do problema de alocação de bancos de capacitores.

Através de uma abordagem multiobjetivo baseada na metaheurística *GreedRandomizedAdaptiveSearch Procedure* (GRASP), ANTUNES *et al* (2014), buscaram o controle ótimo de reativos em um sistema de distribuição radial de 93 barras com a instalação de bancos de capacitores fixos e chaveados. O problema multiobjetivo é traçado de tal forma a equilibrar dois objetivos conflitantes: a minimização das perdas ativas na rede e a minimização do gasto com a instalação de bancos de capacitores. A metaheurística utilizada para otimizar o problema tem como principal característica a qualidade da solução inicial proposta para, a partir dela, efetuar buscas locais. As novas configurações são obtidas por meio de algumas estratégias, tais como, a realocação de um banco para uma barra não compensada; o aumento ou diminuição do valor nominal de um banco já instalado; instalando um novo banco em uma barra não compensada, e; removendo um banco de algum nó da rede. Os resultados são comparados com os obtidos com o uso do NSGA-II para o mesmo problema utilizando a métrica do hipervolume,

ocasião em que se constata uma ligeira melhoria dos resultados do problema considerando a metodologia proposta no trabalho.

As técnicas de otimização multiobjetivo ganham cada vez mais espaço no planejamento de sistemas elétricos de potência, cujo uso vai além do controle de reativos e perdas no sistema. Como exemplo disso, POMBO *et al* (2015), visa o uso da otimização multiobjetivo para manutenção da confiabilidade da rede, propondo a melhoria de condições de operação do sistema de distribuição bem como a confiabilidade do mesmo através da instalação ótima de chaves e religadores na rede levando em consideração o custo dos equipamentos e os índices SAIFI e SAIDI provenientes da norma IEEE 1366 que apontam para a melhoria e confiabilidade.

LEITE *et al* (2016) utilizam o NSGA-II para o dimensionamento e alocação de filtros passivos, objetivando a compensação da potência reativa e da distorção harmônica em um sistema de distribuição de energia que atende consumidores industriais, elevando a qualidade da energia elétrica e buscando benefícios econômicos. A metodologia proposta foi capaz de obter resultados satisfatórios entre diferentes configurações de filtros.

Seguindo uma linha de pesquisa muito semelhante, AZEVEDO *et al* (2016) utilizam o NSGA-II no dimensionamento e alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição, na presença de cargas não lineares, e utilizando diferentes níveis de carregamento. A distorção harmônica é utilizada como uma das funções objetivo e como parâmetro de qualidade de energia, mas não são feitas menções às cartas de ressonância.

Diante do exposto, mostram-se necessárias maiores análises acerca dos parâmetros usados para diagnosticar a existência da ressonância harmônica. Os trabalhos anteriormente mencionados ora usam os índices de distorção propostos na IEEE 519 ora usam o Índice de Ressonância (RI) para compor o conjunto de restrições do PABC. Percebe-se, no entanto, que não há um estudo que compare esses dois parâmetros atestando sua necessidade na composição do problema. Um dos objetivos da presente dissertação é efetuar simulações com o algoritmo NSGA-II combinando esses dois tipos de abordagem de modo a confrontá-las e verificar sua real necessidade dentro do problema.

## **1.2. Objetivos gerais e específicos**

O presente trabalho tem como objetivo geral: formular uma metodologia para alocação ótima e dimensionamento de banco de capacitores incluindo restrições de ressonância harmônica.

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver um programa de computador que aplique a metodologia proposta.
- Otimizar o problema através de uma metaheurística multiobjetiva.
- Verificar qual critério de restrição ao problema é suficiente para otimiza-lo aumentando a vida útil dos bancos de capacitores e atenda as restrições de qualidade de energia.

## **1.3. Organização do trabalho**

Conforme visto, este capítulo destinou-se a descrição do estado da arte no que concerne o PABC e os tipos de abordagens: objetivo único, multiobjetivo, considerando ou não a presença de cargas não lineares.

No Capítulo 2 será feita a descrição dos bancos de capacitores sob seus aspectos construtivos além dos efeitos que os mesmos sofrem quando utilizados nas redes de distribuição urbana de energia elétrica. Atenção especial é dada ao fenômeno de ressonância harmônica e de que forma ele afeta os bancos de capacitores, causando-lhes fadiga e falhas precoces.

O Capítulo 3 será destinado à abordagem dos métodos multiobjetivo, mais precisamente, do NSGA-II. Serão explicados nesse capítulo os operadores específicos do NSGA-II e de que forma esse algoritmo constrói suas soluções a partir da concepção da Fronteira Ótima de Pareto.

O Capítulo 4 apresentará o problema de alocação de banco de capacitores e de que maneira o NSGA-II será utilizado para a sua resolução, incluindo os parâmetros da simulação computacional.

O Capítulo 5 apresenta a descrição da metodologia utilizada neste trabalho e os resultados obtidos. Dentre os itens descritos estão os dados da rede de distribuição, as características das cargas não lineares e os métodos de resolução do fluxo de carga usados.

Posteriormente, serão apresentados os resultados das simulações para os 3 cenários propostos, bem como suas justificativas.

O Capítulo 6 apresentará mais discussões acerca dos resultados, as conclusões do trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

# CAPÍTULO 2. BANCOS DE CAPACITORES EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

## 2.1. Introdução

No final do séc. XIX, emergiram muitas teorias dispostas a mostrar os benefícios do uso de bancos de capacitores em instalações elétricas quando utilizados para melhoria do fator de potência. Ainda assim, os bancos de capacitores constituíam uma alternativa pouco atrativa, tanto do ponto de vista financeiro quanto do ponto de vista técnico. A baixa tecnologia dos materiais utilizados na fabricação de capacitores de potência tornava os projetos onerosos e pouco confiáveis. Não eram incomuns casos de perdas dielétricas provocadas pelo sobreaquecimento nos materiais isolantes ocasionando disrupções.

Após os avanços obtidos nos materiais usados para a fabricação de bancos de capacitores, aspectos construtivos foram melhorados como, por exemplo, suas faixas de operação e seus valores nominais. Outra característica interessante do ponto de vista técnico foi a redução das dimensões dos bancos bem como de seu peso.

As vantagens da instalação de bancos de capacitores são diversas. No entanto, quando submetidos a condições adversas, os bancos de capacitores ficam mais suscetíveis a falhas e têm seu tempo de vida útil reduzido significativamente. A norma IEEE 1036-2010 elenca as principais condições indesejadas a que bancos de capacitores podem ser submetidos nos sistemas de potência.

Neste capítulo iremos apresentar os bancos de capacitores de potência, objeto de estudo deste trabalho, desde os seus aspectos construtivos como os efeitos que os mesmos sofrem que são capazes de diminuir a sua vida útil.

## 2.2. Aspectos construtivos

Os princípios que norteiam a construção de capacitores de potência são os mesmos utilizados na confecção de capacitores de valores nominais mais baixos. A Figura 2-1 mostra várias células capacitivas de diferentes potências nominais de tensão  $13.800/\sqrt{3}$  montadas em estrutura de aço galvanizado e de uso bastante intenso pelas concessionárias de energia

elétricas. Já na Figura 2-2 temos a instalação típica de um banco de capacitores trifásicos que faz parte de uma solução de compensação de potência reativa instalados na rede primária de distribuição da concessionária de energia local da cidade de Belém do Pará.

Figura 2-1: Células capacitivas de média tensão de diferentes potências nominais



Figura 2-2: Banco de Capacitores Trifásico instalados em RDU



A seguir são apresentados os principais elementos que compõem os bancos de capacitores comerciais (MAMEDE, 2001):

**a) Caixa:** é o elemento mais externo, que garante, dentre outros, a proteção das demais partes que compõem o capacitor. A caixa é confeccionada com chapas de aço e inclui os dados de placa da unidade capacitiva. Além dos isoladores, fazem parte da caixa os olhais, cuja função é alçar a unidade capacitiva, e as alças de fixação, que servem para fixar as unidades capacitivas na estrutura de montagem.

**b) Armadura:** sua composição é feita com chapas de alumínio de espessuras pequenas, enroladas com dielétrico. Sua disposição influencia diretamente nas perdas dielétricas e, por esta razão, seus materiais devem ser de alta qualidade.

**c) Dielétrico:** geralmente se usa uma fina camada de filme de polipropileno associada a uma camada de papel dielétrico. Novamente, é necessário o uso de materiais de alta qualidade a fim de evitar as perdas dielétricas excessivas.

**d) Líquido de Impregnação:** por muito tempo foi utilizado o ascarel para essa finalidade. No entanto, suas propriedades eram nocivas ao meio ambiente e às pessoas que lidavam com a manutenção das células capacitivas. Os capacitores atuais possuem uma substância biodegradável, o ecóleo, usado como líquido de impregnação. Esse hidrocarboneto sintético além de ser inofensivo apresenta características elétricas muito melhores que o ascarel.

**e) Resistor de Descarga:** É o elemento encarregado de dissipar a energia restante no capacitor após a retirada da tensão em seus terminais. Esse elemento está relacionado à segurança uma vez que a descarga do capacitor diminui as tensões a um nível máximo de 5 V nos terminais do capacitor.

### **2.3. Degradação de Bancos de Capacitores**

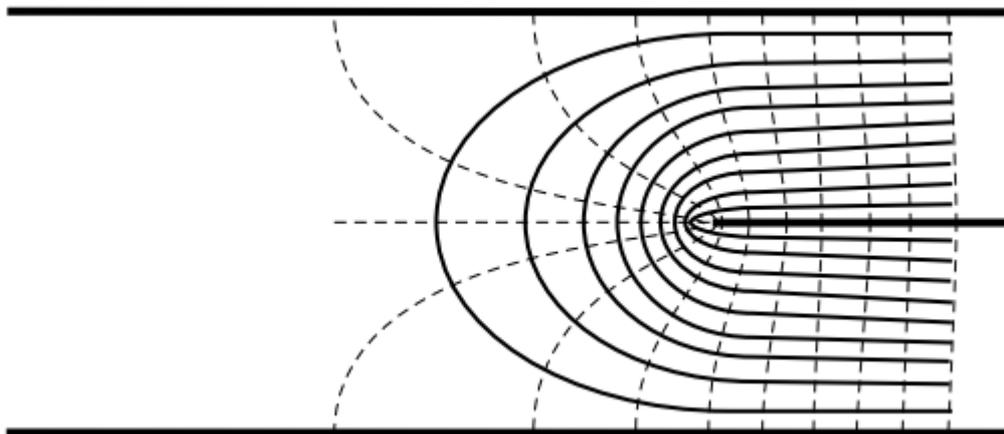
As melhorias propostas nas últimas décadas aos projetos de capacitores, sobretudo a evolução dos componentes dielétricos utilizados, modificaram a forma com que os fenômenos relacionados à sua degradação e falhas precoces eram analisados. Conforme ressalta DUARTE (2000), a atenção dada às perdas dielétricas ganhou força a partir da verificação de melhorias substanciais na utilização de capacitores só-filme em detrimento ao uso de capacitores papel e

filme. Dessa forma, foi necessário observar o funcionamento dos novos capacitores para entender de que forma esses eram afetados pelos fenômenos elétricos já conhecidos.

### 2.3.1. Efeito da degradação das bordas dos eletrodos

Um dos principais fenômenos ocasionados pela sobretensão em capacitores é a ocorrência de descargas parciais. Esse fenômeno acontece especialmente nas bordas dos eletrodos que compõem o capacitor. Na medida em que se aumenta a tensão no capacitor, as descargas parciais crescem até o ponto de se tornarem significativas. A tensão referente a descargas parciais consideráveis é conhecida como tensão de injeção de descargas parciais (TIDP) do capacitor. Essa tensão está relacionada com o valor da tensão de longa duração que o capacitor suporta, denotada como  $E_{\infty}$ . Alguns dos fatores que afetam a TIDP são: a espessura do dielétrico, sua temperatura, tipo do líquido impregnante, tempo no qual o capacitor é submetido à sobretensão, o tipo de borda do eletrodo e a pressão hidrostática do fluido. As bordas dos eletrodos são os locais em que ocorre o maior estresse dielétrico com o aumento da tensão de longa duração. Tal comportamento pode ser visualizado na Figura 2-3.

Figura 2-3: Efeito das bordas de eletrodos no material dielétrico.



FONTE: COOPER POWER SYSTEMS, 2000.

As linhas tracejadas representam as linhas equipotenciais de campo elétrico e a distância entre elas implicará no stress dielétrico no material isolante. Linhas de campo mais agrupadas significam maior stress dielétrico. Em contrapartida, linhas mais espaçadas indicam pouco

stress dielétrico do material isolante. Percebe-se que a região de maior agrupamento das linhas de campo se dá nas bordas dos eletrodos. A diminuição do material isolante aumentaria esse efeito. É exatamente essa característica física indesejada que contribui para a degradação das bordas dos eletrodos.

Do conhecimento advindo da ciência dos materiais, sabe-se que a temperatura altera as propriedades físicas de um dielétrico. De fato, a exposição do material dielétrico a temperaturas elevadas facilitará a ocorrência de descargas parciais. Por outro lado, baixas temperaturas implicariam em alta viscosidade do óleo impregnante, o que dificultaria as trocas de gases em um início de ruptura dielétrica e resultaria na falha total do capacitor (SCHIMIDT, 2010).

### 2.3.2. Efeitos da temperatura

O dielétrico, sob a ação de um campo elétrico orientado, sofre aquecimento por conta da energia absorvida com a polarização. O material isolante de um capacitor sofre, portanto, uma “destruição térmica” (SCHIMIDT, 2010), cujos efeitos macroscópicos se apresentam na formação de fissuras, carbonização e amolecimento do referido material. A consequência em termos da propriedade elétrica do dielétrico é a diminuição de seu poder de isolamento. Ocorre, assim, a chamada ruptura térmica.

Não se deve confundir os conceitos de ruptura elétrica e ruptura térmica do dielétrico. Enquanto na primeira a tensão de ruptura é uma característica intrínseca do material, a segunda está mais ligada à frequência da tensão aplicada, a estabilidade térmica do material, as condições de refrigeração e a temperatura do meio envolvente.

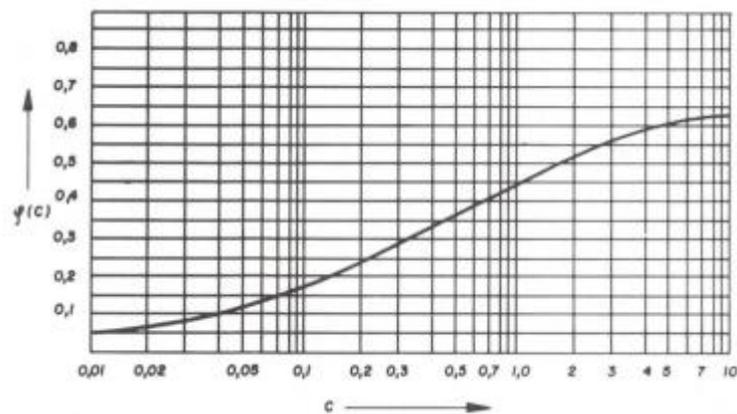
O cálculo da tensão de ruptura térmica de um material isolante depende, dentre outros fatores, da estabilidade térmica do material e do ângulo de perdas em função da temperatura. Nessas condições o valor da tensão de ruptura térmica (SCHIMIDT, 2010) é dado por (2-1):

$$V_{ef} = 7,78 \sqrt{\frac{k}{\alpha \cdot \epsilon_o \cdot f \cdot \text{tg}(\delta_o)}} 10^6 \cdot \varphi(C) \quad (2-1)$$

Nessa equação,  $f$  é a frequência simples;  $\alpha$  é a constante dielétrica do material isolante; o termo  $tg(\delta_o)$  é o fator de perdas nas condições ambientais; a função  $\varphi(C)$  pode ser estimada através das características do material isolante presentes no manual do fabricante, sendo que é dado por (2-2):

$$C = \frac{k_1 \cdot \sigma \cdot h}{k \cdot (k_1 + \sigma \cdot l)} \quad (2-2)$$

Figura 2-4: Função  $\varphi(C)$  para o cálculo da tensão de ruptura térmica de um dielétrico



Fonte: SCHIMIDT, 2010.

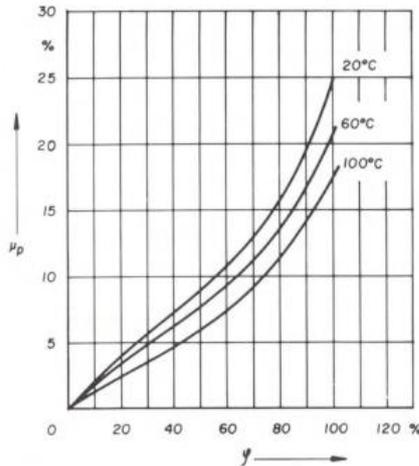
Os fatores  $k_1$  e  $k$  são os coeficientes de condutibilidade térmica do eletrodo e do dielétrico respectivamente. São as distâncias dos eletrodos em relação ao dielétrico.

### 2.3.3. Efeito da umidade

Outro fator que pode ser determinante no desempenho do material dielétrico que compõe o capacitor é a exposição à água. Embora o efeito higroscópico não altere de forma significativa as propriedades desejáveis do material isolante, ele contribui conjuntamente com os outros efeitos levando à ocorrência de descargas parciais e, conseqüentemente, do envelhecimento precoce do material isolante.

A umidade é dependente da temperatura do material isolante, conforme mostra a Figura 2-5. Observa-se que aumentando a temperatura diminui-se o grau de absorção de umidade do material ( $\mu_p$ ), mantendo-se a umidade do ambiente ( $\varphi$ ) constante.

Figura 2-5: Dependência da umidade do material isolante com a temperatura.



Fonte: SCHIMIDT, 2010.

#### 2.4. Falhas de capacitores em sistemas de potência.

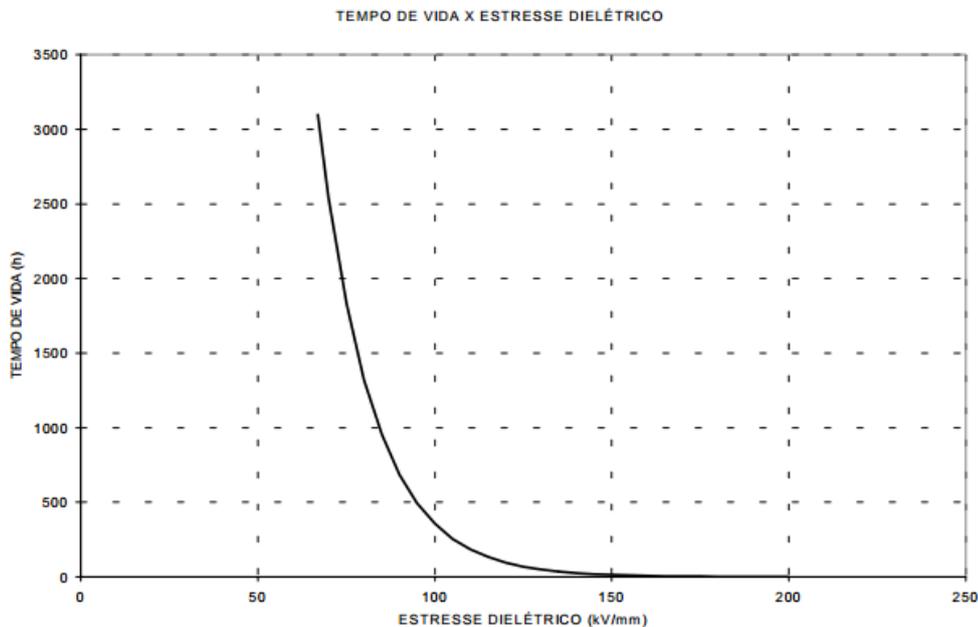
Um estudo estatístico realizado pelo Instituto Americano de Engenharia Elétrica (AIEE) em 1949, elencou as principais causas de falhas em bancos de capacitores instalados em sistemas de potência. Um resultado interessante é que todas as falhas relacionadas à sobretensão ocorreram nos níveis de distribuição primária, entre 2.3 e 6.8 kV. Ressalta-se que o estudo avaliou bancos de capacitores em faixas de tensão que partem de valores inferiores a 600 V até valores acima de 12,5 kV. Foi apontado, ainda, que 60% das falhas causadas por sobretensão ocorreram em menos de 1 ano de instalação dos bancos de capacitores. Essa última estatística pode ser explicada pelo aumento do aquecimento com o aumento da tensão aplicada ao material isolante, que reduziria consideravelmente seu tempo de vida útil, conforme já mencionado.

Um segundo quesito avaliado pelo mesmo grupo de estudos apontou que outra causa relevante na falha e até mesmo perda de bancos de capacitores de forma precoce seria a forma de onda da tensão, ou seja, as perdas dielétricas também são causadas pela distorção da tensão a que o capacitor é submetido. De fato, a presença de harmônicos na tensão de alimentação do capacitor aumenta a incidência de descargas parciais e o sobreaquecimento. O resultado do

estudo revelou que 100 % dos bancos instalados apresentaram problemas de funcionamento em menos de um ano de uso.

Bancos de capacitores alimentados por tensões distorcidas podem ressoar causando a amplificação de algumas frequências harmônicas. O trabalho de DUARTE e ALVES (2001) revela que embora a tecnologia empregada nos materiais dielétricos que compõem os capacitores de potência tenha evoluído bastante, o aumento de cargas não lineares e, conseqüentemente, dos níveis de distorção da forma de onda da tensão implicaram no aumento da incidência de descargas parciais. Isso se deve ao fato dos harmônicos muitas vezes elevarem o valor de pico da forma de onda resultante, o que é suficiente para causar um maior estresse dielétrico em algumas regiões do material isolante. A Figura 2-6 mostra o decaimento exponencial da vida útil de um capacitor de potência (SEBILLOTTE *et al*, 1992; DUARTE, 2000; DUARTE e ALVES, 2001) diante do aumento do estresse dielétrico, dado em kV/mm.

Figura 2-6: Estresse dielétrico versus tempo de vida do isolante de um capacitor de potência.



Fonte: DUARTE E ALVES, 2001.

A tensão nominal, o tempo de vida útil de um capacitor de potência é de cerca de 20 anos. Nota-se que fora das condições nominais favoráveis, a instalação de bancos de capacitores passa

a não mais justificar seu emprego, sob o ponto de vista econômico haja vista as melhorias não agregarem retorno financeiro antes de sua provável substituição (GARCIA, 2001; GARCIA, 2005).

## **2.5. Ressonância harmônica em bancos de capacitores**

O fenômeno de ressonância harmônica em sistemas elétricos ocorre quando um harmônico produzido pelas cargas não lineares ressoa com uma das frequências naturais do sistema, provocando o aumento da distorção harmônica e, em alguns casos, o aumento das tensões de barras e correntes nas linhas da referida rede. A Norma IEEE 519 elenca a ressonância harmônica como um dos principais causadores do aumento de distorção harmônica nos sistemas de distribuição.

Não se deve confundir a ressonância harmônica com a ressonância resultante da ocorrência de transitórios na rede. Enquanto a primeira está associada às componentes harmônicas que são eventos em regime permanente, múltiplos da frequência fundamental; essa última está ligada aos eventos de curtíssima duração em que as frequências observadas não apresentam nenhuma relação com a frequência fundamental (SILVA, 2004).

### **2.5.1. Ressonância Série**

Em sistemas de potência, a ressonância série é geralmente observada na associação série entre bancos de capacitores e as indutâncias das linhas ou indutâncias de transformadores. Resultam em um caminho de baixa impedância para a frequência harmônica em questão, facilitando a passagem da componente de corrente na frequência sintonizada (TEIXEIRA, 2009).

### **2.5.2. Ressonância Paralela**

A ressonância paralela por sua vez ocorre quando a capacitância e a indutância total instalada em uma barra excitam a frequência de algum dos harmônicos presentes na rede. Como exemplo, cita-se uma indústria que, na busca de melhorias no fator de potência, instala um Banco de Capacitores próximo ao ponto de acoplamento comum (PAC) que juntamente com a

impedância equivalente total vista daquele ponto apresentam uma frequência de ressonância equivalente a algum harmônico geralmente produzido por uma carga não-linear da própria indústria (MANITO, 2009).

## **2.6. Ferramentas de Análise de Ressonância Harmônica**

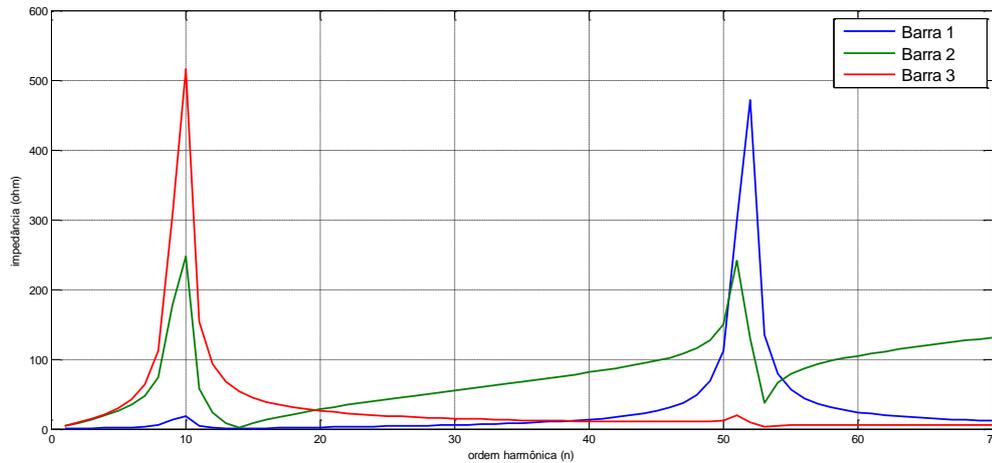
### **2.6.1. Varredura de Frequências (Frequency Scan)**

Geralmente utilizada na obtenção rápida e simples da resposta da rede às diferentes componentes harmônicas, o Método de Varredura de Frequências, como o próprio nome sugere, realiza a verificação sistemática da resposta do sistema para uma determinada faixa de frequências. Os resultados são conseguidos a partir da construção da matriz admitância nodal, cuja formação se faz levando em consideração o modelo harmônico para os elementos do sistema. Considerando o sistema composto somente por componentes lineares, é possível estimar as tensões harmônicas nas barras do sistema quando uma fonte harmônica de amplitude 1 p.u. constante e frequência variável dentro da faixa considerada. O sistema aproximadamente linear (2-3) é resolvido para cada frequência sugerida.

$$[I_h] = [Y_h][V_h] \quad \text{para } f_{\min} \leq h \leq f_{\max} \quad (2-3)$$

A partir da figura de mérito gerada (Figura 2-7), é possível identificar as frequências com grandes chances de apresentar ressonância harmônica, tanto a série (representada pelos vales) quanto a paralela (representada pelos picos).

Figura 2-7: Análise da varredura de frequências para um sistema de 3 barras.



Fonte: Adaptado de XU *et al*, 2005.

### 2.6.2. Índice de Ressonância (RI)

Embora o estudo da Varredura de Frequências já consiga orientar quais as frequências naturais do sistema que podem ocasionar a ressonância harmônica, seu estudo não é suficiente para determinação de ocorrência desse fenômeno, uma vez que se faz necessário o conhecimento dos níveis dos harmônicos presentes na rede. Além disso, é preciso identificar qual a severidade do alto nível de distorção causado pela ressonância harmônica.

Nesse sentido, HUANG *et al* (2003) propõem o Índice de Ressonância, RI, baseado nos limites propostos pela norma IEEE 1036 que, em linhas gerais, dispõe acerca das diretrizes referentes à instalação de bancos de capacitores. Assim, as inequações (2-4), (2-5), (2-6) e (2-7) precisam ser satisfeitas para que não haja problemas com o banco de capacitor a ser instalado.

$$\sqrt{1 + \sum_n \left( \frac{\alpha_n RI_n}{n} \right)^2} \cdot \sqrt{1 + \sum_n (\alpha_n RI_n)^2} \leq 135\% \quad (2-4)$$

$$\sqrt{1 + \sum_n \left( \frac{\alpha_n}{n} RI_n \right)^2} \leq 110\% \quad (2-5)$$

$$1 + \sum_n \left( \frac{\alpha_n}{n} RI_n \right) \leq 120\% \quad (2-6)$$

$$\sqrt{1 + \sum_n (\alpha_n RI_n)^2} \leq 180\% \quad (2-7)$$

Onde,  $RI_n$  é o índice de ressonância definido conforme a equação (2-8) e  $\alpha_n$  representa a distorção harmônica individual (IHD) para o harmônico de ordem 'n'.

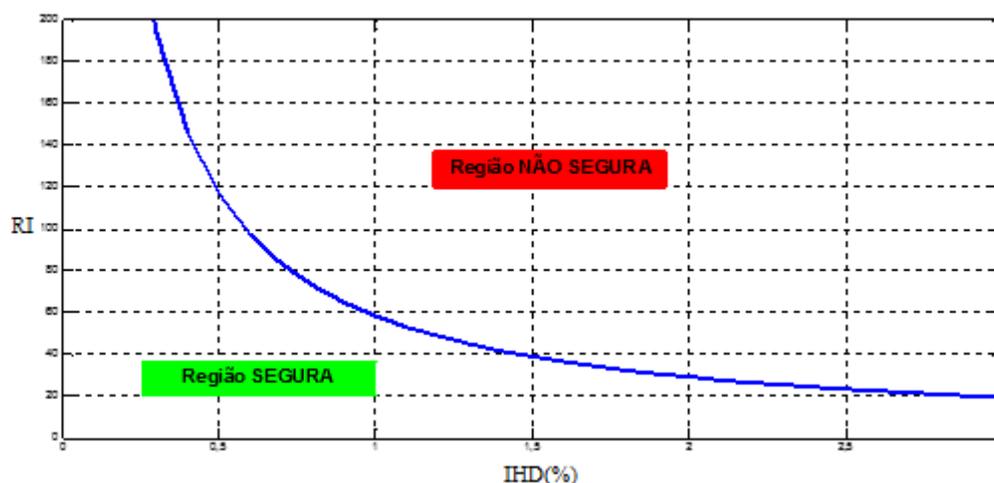
$$RI = \frac{Y_n}{Y_1} \quad (2-8)$$

Em que,  $Y_n$  e  $Y_1$  representam a admitância total calculada na frequência de ordem 'n' e na frequência fundamental, respectivamente.

Depreende-se que a definição de RI perpassa pelo conhecimento da Varredura de Frequências, haja vista ser necessária a determinação da impedância equivalente vista a partir do ponto em que se deseja instalar o banco de capacitores.

A observância dos limites da norma IEEE 1036 gera um conjunto de curvas características no plano formado pelo IHD e pelo RI denominado de Carta de Ressonância. A escolha da curva para análise de ressonância depende do número de harmônicos com IHD significativo. A Figura 2-8 exemplifica o uso da carta considerando a 5ª e 7ª componentes harmônicas.

Figura 2-8: Curva do RI considerando o 5º e 7º harmônicos



Percebe-se que a curva apresentada na Figura 2-8 divide o plano em 2 regiões. Qualquer barra candidata a receber um banco de capacitores que apresentar um IHD e um RI que juntos resultem em um ponto acima da curva, certamente apresentará problemas a esses elementos acarretando em sua inutilização. Por outro lado, a região abaixo da curva representa todas as combinações de IHD e RI que não causariam grandes problemas ao banco de capacitores a ser instalado.

Caso não haja informações suficientes sobre o espectro harmônico, considera-se o pior caso que seria um IHD de 3% para todos os harmônicos considerados no problema.

## 2.7. Conclusões

Este capítulo teve como objetivo apresentar os bancos de capacitores de potência e descrever os efeitos responsáveis pela sua degradação. O principal efeito apresentado foi o da Ressonância Harmônica o qual é apontado pela IEEE 519-2014 como o principal fenômeno para o aumento dos níveis de distorção harmônica nos sistemas de potência.

O método da varredura de frequência é um conhecido método de análise harmônica modelado no domínio da frequência, seus resultados são mais confiáveis que o cálculo direto da frequência de ressonância, porém limita-se em apresentar resultados apenas das frequências naturais de um sistema de energia elétrica, na relacionando diretamente a ressonância harmônica.

Foi introduzido o método de análise de Ressonância Harmônica proposto em 2003, por Huang *et alii* o RI, e também é baseado na análise do impacto que a ressonância provoca no sistema, culminando na formulação das inequações (2-4), (2-5), (2-6) e (2-7) que são de grande importância para o desenvolvimento das metodologias utilizadas neste trabalho, pois estas inequações serão inseridos como restrições de desigualdades na formulação do problema de otimização.

Definidos os limites de operação de bancos de capacitores de potência, passa-se a descrever a metaheurística que será utilizada para otimizar a alocação dos bancos em redes de distribuição de energia elétrica que venha a obedecer esses limites para que os mesmos não venham a sofrer avarias.

# CAPÍTULO 3. OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO USANDO ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS

## 3.1. Introdução

Na literatura existem inúmeras técnicas para resolver problemas de otimização elaborados como problemas de obtenção de valores de um conjunto de variáveis as quais satisfazem um conjunto de restrições de forma a otimizar, isto é, maximizar ou minimizar uma determinada função, doravante chamada de função objetivo.

Não obstante, muitos problemas encontrados na engenharia seriam mais adequadamente elaborados em termos de múltiplos objetivos a serem otimizados (maximizados e/ou minimizados). Por exemplo, os sistemas elétricos de potência trazem uma seara rica para aplicações dos algoritmos de otimização MO. Especificamente, em planejamento de redes de distribuição de energia elétrica, tal como é abordado nesta dissertação, normalmente é importante minimizar o custo de operação e execução do sistema ao mesmo tempo em que também se faz necessário otimizar índices de desempenho diversos dentre os quais podem-se citar o controle das variáveis elétricas, motivado pelos parâmetros normativos vigentes. É importante ressaltar que o projeto final, que será uma rede de distribuição mais eficiente, deverá demonstrar um bom desempenho em todos os objetivos a serem otimizados e não somente em um dos objetivos apenas. Vale ressaltar que o desafio é otimizar as diversas funções objetivos as quais são, por vezes, conflitantes.

A solução de problemas de otimização MO resulta em um conjunto de soluções ótimas que envolve situações de *trade-off* (situação em que há conflito de escolha), mais popularmente conhecidas como soluções Pareto-ótima. Os problemas de otimização MO foram resolvidos adequadamente utilizando algoritmos evolutivos uma vez que os mesmos podem utilizar uma abordagem populacional (múltiplas soluções) no procedimento de pesquisa.

Neste Capítulo é apresentado os conceitos envolvidos para a realização de uma otimização sob a ótica multiobjetivo necessários para a implementação da metaheurística utilizada neste trabalho.

### **3.2. Otimização**

As inúmeras técnicas de otimização têm como meta a determinação dos extremos, ou seja, busca por valores de variáveis (solução do problema de otimização) que resultem nos máximos ou mínimos de funções dentro de um determinado domínio. Estes extremos, que são a solução ótima do problema de otimização a ser alcançado, representam o fator de mérito do sistema que se deseja construir, operar ou analisar. Se o sistema a ser construído, operado e/ou analisado for uma rede de distribuição de energia elétrica, a função pode representar o seu custo de construção, ou custo das perdas técnicas, ou custo das faltas na rede, ou vários outros fatores de mérito que poderiam ser abordados nesse problema de natureza complexa, combinatória e não-linear que, como qualquer outro problema dentro da engenharia, está sujeito a restrições tecnológicas, físicas e normativas.

Nesse contexto, o extremo da função deve ser entendido como a melhor maneira possível de se construir a rede de distribuição de energia de tal forma que o custo de investimento e redimensionamento seja o mínimo possível, ou representa a máxima eficiência da rede, ou o mínimo custo com as faltas, etc. Chama-se de região do espaço de busca das variáveis o domínio no qual a otimização é realizada. Esta região corresponde ao conjunto de soluções disponíveis para a construção da rede de distribuição em questão.

### **3.3. Algoritmo Evolutivo para Problemas de Otimização Mono-objetivo**

Embora os princípios sobre Algoritmos Genéticos (AG's) sejam bastante consolidados na literatura vigente, torna-se oportuno sua abordagem uma vez que os algoritmos multiobjetivos utilizados no desenvolvimento deste trabalho tem como base o AG. Os algoritmos genéticos fazem parte do grande grupo "Computação Evolutiva", os quais tem como base os conceitos da Teoria da Evolução do pesquisador britânico Charles Darwin. Por exemplo, tem-se a existência de populações de indivíduos que competem entre si em um ambiente de recursos limitados. Nesse ambiente, os indivíduos que possuírem habilidade para vencer as adversidades terão mais chance de gerar descendentes. A partir daí os indivíduos mais bem adaptados terão mais chance de gerar descendentes que carregarão seu material genético às próximas gerações. Todos esses conceitos recebem significados matemáticos no AG (DE JONG, 2006).

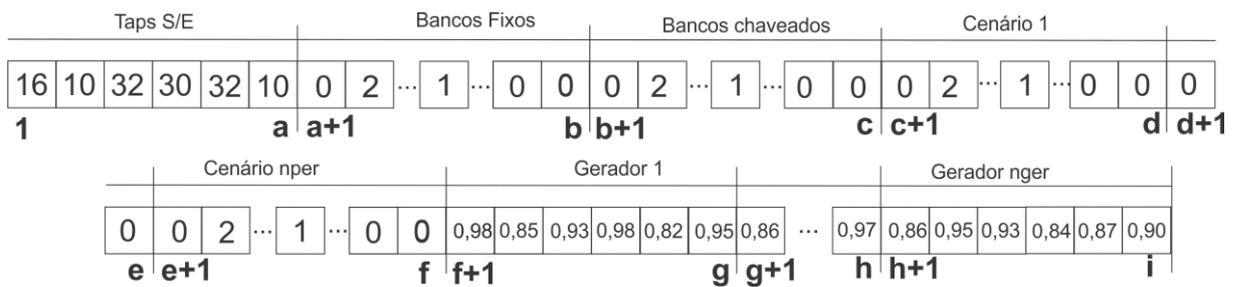
### 3.3.1. Cromossomo

Os indivíduos de uma população são representados nos AGs através de seu material genético, ou seja, através das informações de uma ou mais variáveis do problema. As combinações possíveis de valores que essas variáveis podem obter constitui o espaço de busca, que abrange o conjunto de soluções factíveis para o problema abordado. LEE e EL-SHARKAWI (2008) asseveram que a escolha inadequada do tipo de representação pode levar ao insucesso do processo de otimização. Basicamente, são duas as formas de representação matemática de um cromossomo: representação binária e representação real (YU e GEN, 2010). Outras formas de representação constituem casos específicos ou combinações das duas formas mencionadas. Como exemplo, tem-se a representação inteira e a representação por estruturas (matrizes, vetores, listas, etc.).

Originalmente, os AGs foram desenvolvidos com a representação cromossômica binária pois a proposta era a emulação fiel de um cromossomo real. Um tipo específico de representação codifica uma variável com valores compreendidos em um intervalo real em quantidades binárias, formando o cromossomo. Apesar desse tipo de representação possuir peculiaridades indesejáveis no que tange ao esforço computacional exigido (quanto maior a precisão desejada, maior será o número de bits necessários para a representação do cromossomo e, conseqüentemente, maior será o esforço computacional), a forma relativamente simples com que se pode trabalhar as rotinas computacionais específicas do AG, sobretudo na aplicação abordada nessa proposta de dissertação, justifica a escolha dessa representação para o fim almejado. Além disso, o esforço computacional pode ser diminuído com a programação de baixo nível proporcionada pela implementação das rotinas do AG através de operações binárias (ÁVILA, 2006).

Para o PABC e dimensionamento ótimo de bancos de capacitores, PEREIRA JÚNIOR (2009) utiliza a representação inteira na construção do cromossomo (Figura 3-1). Percebe-se que o modelo do cromossomo utilizado é bem completo, buscando representar muitas das variáveis envolvidas no problema.

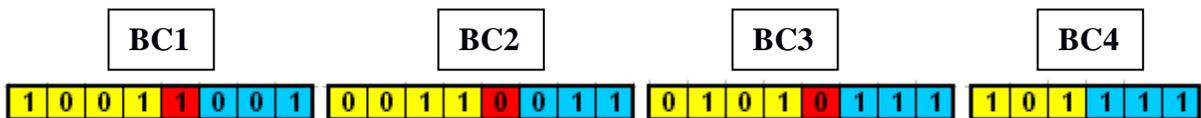
Figura 3-1: Representação inteira para o cromossomo de um AG aplicado ao PADBC



Fonte: PEREIRA JR, 2009

A Figura 3-2 mostra o exemplo de representação binária de um cromossomo para o PADBC (GODOI,2009).

Figura 3-2: Representação binária para o cromossomo de um AG aplicado ao PADBC



Fonte: GODOI, 2009

### 3.3.2. Aptidão

Apesar de muitas vezes ser confundida com a função objetivo, a aptidão é um conceito mais abrangente. Enquanto a função objetivo apenas realiza uma avaliação dos indivíduos de uma determinada população, a aptidão realiza uma comparação entre todos os indivíduos da população a fim de estabelecer quais irão ser selecionados para gerar descendentes. Essa diferença será melhor observada quando forem abordados os algoritmos MO. A determinação de quais indivíduos serão comparados é feita através de um método aleatório.

### 3.3.3. Seleção

AS heurísticas garantem a convergência do processo de otimização através de algum método estocástico. Mais do que a mutação e o cruzamento, a seleção é responsável pela determinação

da convergência dos AGs. Dessa forma, a seleção busca favorecer os indivíduos com melhores resultados frente a função objetivo. Assim, quanto maior a pressão seletiva maior será a taxa de convergência.

Dentre os métodos conhecidos, destacam-se:

- Seleção pelo método da roleta;
- Seleção por torneio.

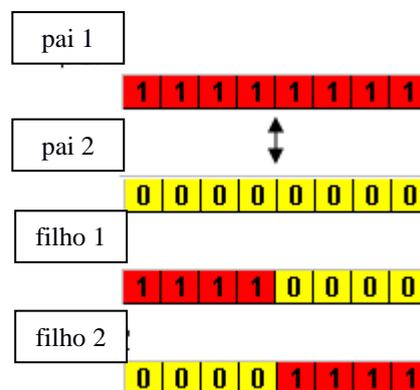
### 3.3.4. Operadores Genéticos

Os operadores genéticos constituem o meio pelo qual o AG realiza duas importantes funções de um algoritmo de otimização: exploração e convergência. LEE e EL-SHARKAWI (2008). Os operadores genéticos atuam sobre os elementos selecionados originando novas soluções (GASPAR CUNHA *et al*, 2013), agindo como um mecanismos de perturbação dentro do algoritmo. Os operadores genéticos são o cruzamento e a mutação:

#### a) Cruzamento

Um problema muito frequente é a baixa taxa de convergência, o que dificulta na determinação de um ótimo para o problema. Para contornar esse problema no AG, o cruzamento é responsável por fazer com que o material genético dos indivíduos selecionados passe às próximas gerações. Em termos práticos, isso significa que, gradativamente, os novos indivíduos serão gerados próximos aos pontos ótimos.

Figura 3-3: Exemplo de cruzamento para cromossomos de representação binária



Fonte: GODOI (2009)

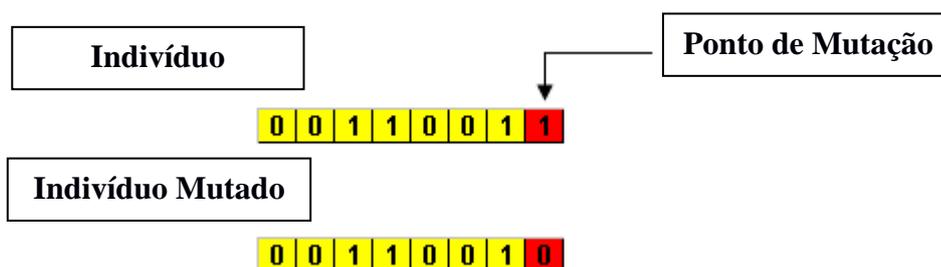
Para efetuar o cruzamento, dois indivíduos são selecionados e cortados em uma ou mais posições dos cromossomos que os representam (mesma posição para ambos). A partir daí, procede-se com a recombinação das partes que compreendem os bits menos significativos de cada um dos cromossomos permanecendo intacta a parte com os bits mais significativos (*schema*). A Figura 3-3 apresenta o cruzamento com um ponto de corte. (GODOI, 2009)

### b) Mutação

Um dos grandes problemas dos algoritmos de otimização em geral é a convergência prematura do algoritmo. Isso acontece com relativa frequência quando o problema é multimodal (vários valores de ótimos locais). A mutação é a parte do AG que busca minimizar as chances de acontecer tal situação. Na medida em que o AG avança às próximas gerações, o processo de mutação vai ganhando importância e garantindo a manutenção da diversidade da população.

O processo de mutação requer que indivíduos sejam escolhidos aleatoriamente, segundo a taxa de mutação previamente determinada, para que haja mudança de um bit dentro da estrutura cromossômica. A Figura 3-4 apresenta um exemplo de mutação aplicada a um cromossomo de representação binária.

Figura 3-4: Exemplo de mutação em um cromossomo de representação binária



Fonte: GODOI (2009)

### 3.3.5. Elitismo

O elitismo é a forma com que o algoritmo recompensa os indivíduos mais aptos, uma vez que seus materiais genéticos são copiados integralmente para as próximas gerações. Nota-se, portanto, que se trata de outro mecanismo implementado para levar o algoritmo à convergência. O uso indiscriminado desse recurso, entretanto, pode incorrer em convergência prematura.

### 3.4. Problemas de Otimização Multiobjetivo

Um problema de otimização multiobjetivo tem um conjunto de funções objetivos que devem ser otimizadas simultaneamente. Como mencionado anteriormente, o problema torna-se desafiador quando as funções objetivos são conflitantes entre si, ou seja, a solução ótima de uma função objetivo é contrária de cada uma das outras funções a serem otimizadas conjuntamente.

Além disso, o problema pode ou não possuir restrições de igualdade e/ou desigualdade que devem ser atendidas para que uma solução seja considerada factível para o problema, satisfazendo os objetivos designados no problema de tal modo a encontrar o melhor compromisso entre eles.

A formulação dos problemas de MO é definido conforme (3-1) (DEB, 2001). Percebe-se que existem múltiplas funções objetivos constituindo vários problemas que podem ser de minimização ou maximização.

$$\left. \begin{array}{l} \text{maximizar/minimizar } f_m(x), \\ \text{restrita a} \quad \quad \quad g_j(x) \geq 0, \\ \quad \quad \quad \quad \quad h_k(x) = 0, \\ \quad \quad \quad \quad \quad x_i^{(\text{inf})} \leq x_i \leq x_i^{(\text{sup})} \end{array} \right\} \begin{array}{l} m = 1, 2, \dots, N_{obj} \\ j = 1, 2, \dots, NR_{des} \\ k = 1, 2, \dots, NR_{igu} \\ i = 1, 2, \dots, N_{var} \end{array} \quad (3-1)$$

Onde:

A solução  $x \in R^n$

$f_m(x)$	→	m-ésima função objetivo a ser otimizada
$g_j(x)$	→	j-ésima restrições de desigualdade
$h_k(x)$	→	k-ésima restrições de igualdade
$x_i, x_i^{(\text{inf})}$ e $x_i^{(\text{sup})}$	→	i-ésima variável de decisão, seu limite inferior e superior, respectivamente.

Para vencer esse obstáculo, buscou-se alguns conceitos dentro das ciências econômicas, as quais lidam diretamente com objetivos conflitantes. Como exemplo de objetivos conflitantes, tem-se a busca da diminuição de custos operacionais enquanto se mantém o crescimento da produção.

Um segundo exemplo bastante didático busca a máxima distância com o gasto mínimo de energia (Figura 3-5). O inverso da distância foi utilizado no problema para mudar o caráter do problema de maximização para minimização.

### 3.4.1. Otimalidade de Pareto

O problema de otimização MO é definido conforme (3-1). Percebe-se que existem múltiplos objetivos constituindo vários problemas que podem ser de minimização ou maximização.

Para analisar os resultados da otimização de problemas MO, recorre-se à contribuição dada pelo engenheiro e economista franco-italiano Vilfredo Frederico Damaso Pareto à Economia Neoclássica, quando em seu livro intitulado *Cours d'Économie Politique*, propõe em linhas gerais que “o bem estar de uma sociedade é máximo se não existe outro estado tal qual seja possível aumentar o bem-estar de um indivíduo sem diminuir o bem-estar dos demais; isto é, não há forma de melhorar a situação de um, sem prejudicar a situação dos outros”. (PARETO, 1909)

Esse enunciado, reflete o conceito de Ótimo de Pareto, também conhecido como Princípio da Eficiência de Pareto, o qual teve sua área de aplicação estendida a diversos campos de pesquisa, sobretudo nos trabalhos de otimização multiobjetivo em que a quantidade de

problemas envolvendo *trade-offs* (situações de escolha entre soluções de objetivos conflitantes) é deveras considerável.

Figura 3-5: Fronteira de Pareto para o paradoxo velocidade X energia



Fonte: LEE e EL-SHARKAWI, 2008 (modificado)

### 3.4.2. Dominância

Para construir uma análise simultânea dos objetivos envolvidos no problema MO, é necessário usar o conceito de dominância. Assim, diz-se que uma solução factível  $x$  domina uma outra solução também factível  $y$  se as seguintes condições são satisfeitas:

- A solução  $x$  é pelo menos igual a  $y$  em todas as funções objetivo;
- A solução  $x$  é superior a  $y$  em pelo menos uma das funções objetivo.

Isso significa que a solução  $x$  precisa ser estritamente superior que a solução  $y$  no campo dos objetivos.

Como exemplo, voltando à Figura 3-5, observa-se que para uma mesma distância percorrida o carro necessita de mais energia se comparado à moto, o que significa que a moto domina o carro no espaço dos objetivos. Por outro lado, não há relação de dominância entre a

moto e o avião pois enquanto a primeira é superior no objetivo 1 (energia) o segundo a supera no objetivo 2 (1/distância). Em compensação, os dois veículos são estritamente superiores aos seus pares.

O conjunto de todas as soluções não-dominadas recebe o nome de Fronteira de Pareto e, ao final do processo de otimização, representam a resposta do problema MO.

A Figura 3-6 mostra vários exemplos de conjuntos Pareto-ótimos, formados devido às várias combinações de maximização/minimização de duas funções objetivos  $f_1$  e  $f_2$ . A curva destacada indica onde o conjunto de Pareto-ótimo está localizado em relação ao espaço dos objetivos do problema. A Figura 3-6 também ilustra que é possível ter conjuntos de Pareto-ótimos formado por uma região contínua ou pela união de regiões descontínuas.

Existe o conceito de ótimo local em problemas de otimização MO. A Figura 3-7 mostra dois conjuntos Pareto-ótimos que não são dominados localmente, mostrando a sua redondeza no espaço de objetivos e no espaço de variáveis (à direita).

Figura 3-6: Conjunto de Pareto-ótimos em relação a otimização dos objetivos

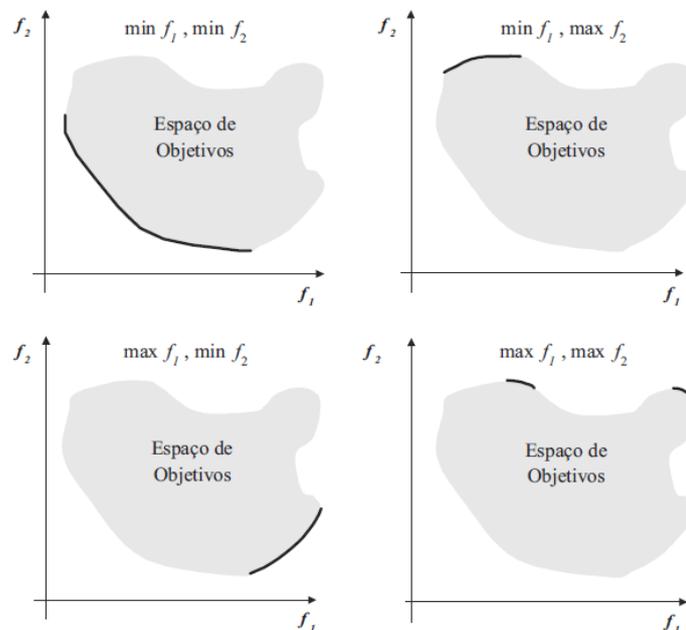
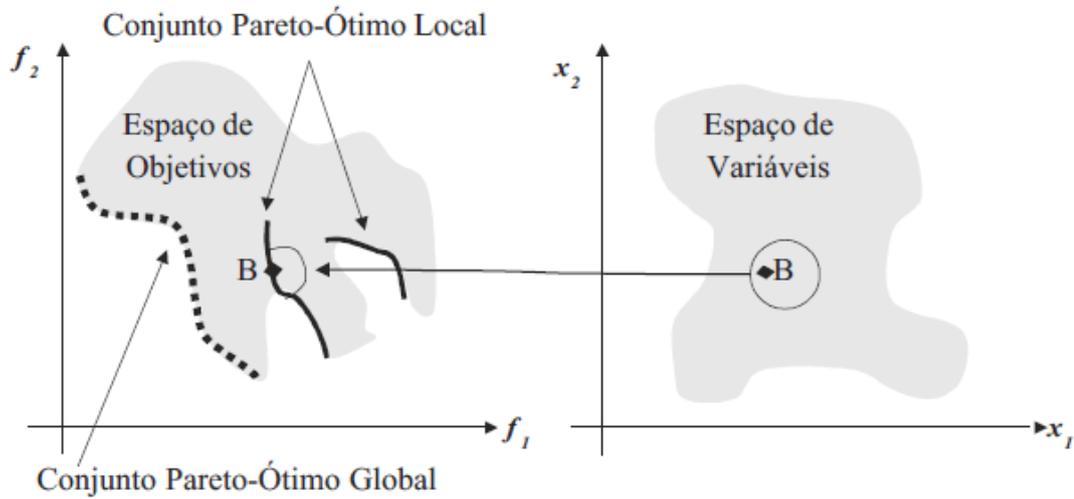
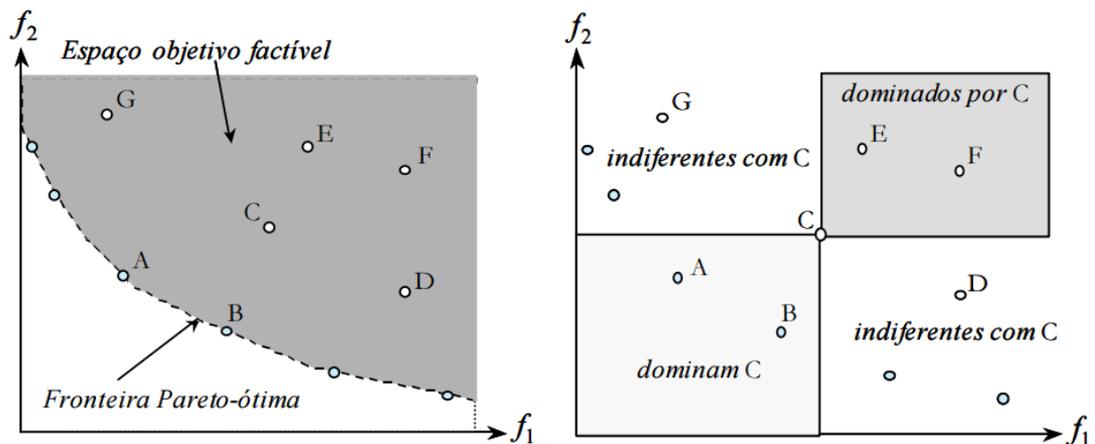


Figura 3-7: Soluções Pareto-ótimas locais e globais



Para uma explicação visual da formação do conjunto de Pareto-ótimo para a minimização de duas funções objetivos tem-se a Figura 3-8 que mostra o quadrante de análise para a formação do conjunto. O conjunto de Pareto é formado nos quadrantes sinalizados como indiferentes ao se analisar a solução C.

Figura 3-8: Ilustração do conceito de dominância de Pareto para minimização das duas funções objetivos.



Fonte: ARROYO (2002), adaptado.

### 3.4.3. Decisão

Além da determinação das soluções ótimas, outra etapa essencial é a decisão da solução final dentre todas aquelas que compõem a Fronteira de Pareto. Nota-se que essa característica interessa ao projetista pois pode adequar a solução às suas conveniências.

De acordo com a etapa do processo em que é empregada, a decisão pode ser:

- Decisão a priori: consiste nas estratégias elaboradas pelo projetista para delimitar o espaço de busca fazendo com que o processo de otimização seja mais célere. Necessita, no entanto, da aplicação dos conhecimentos do projetista para direcionar o decisor sob pena de não conseguir o efeito desejado.
- Decisão progressiva: é a intervenção tomada durante o processo de otimização. Também para esse tipo de decisão, torna-se necessário o conhecimento do projetista.
- Decisão a posteriori: é a opção mais comum dentre as apresentadas. A decisão é tomada depois de terminada a Fronteira de Pareto, dando flexibilidade ao projetista/operador.

Uma boa prática consiste em usar mais de uma das estratégias de decisão, aplicando as condições desejadas antes, durante ou depois do processo.

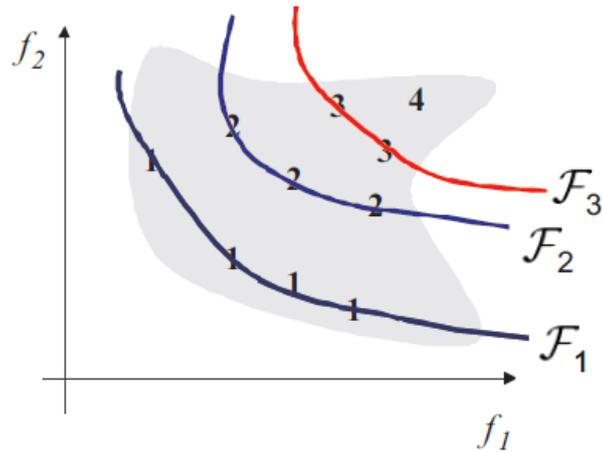
### 3.5. *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)*

Desde que surgiram, em 1985, os métodos de otimização MO baseados no AG têm sido utilizados na resolução dos mais variados tipos de problema, os quais perpassam por áreas diversas como economia, meteorologia, saúde, arquitetura e engenharias, por exemplo. O primeiro deles, proposto por SCHAFFER (1985), denominado VEGA (*Vector Evaluated Genetic Algorithm*) é apenas uma extensão do AG convencional para problemas MO. Depois disso, muitas outras abordagens para o tratamento de problemas MO foram propostas. O NSGA-II é uma dessas abordagens, cuja característica principal é a ordenação dos indivíduos por não-dominância.

O ordenamento por não-dominância consiste em utilizar o conceito de dominância (3.4.2) para ranquear os indivíduos, formando as fronteiras. Assim, a fronteira 1 é composta por todos os indivíduos não-dominados dentro da população. À fronteira 2, por sua vez, integram os indivíduos que são dominados apenas pelos indivíduos da fronteira 1 e que dominam todos os indivíduos das fronteiras consecutivas. Os indivíduos pertencentes às demais fronteiras são

organizados seguindo a lógica tomada anteriormente. Essa dinâmica pode ser constatada através da Figura 3-9.

Figura 3-9: Formação das Fronteiras durante o NSGA-II



FONTE: DEB, 2001

### 3.5.1. Distância de Multidão

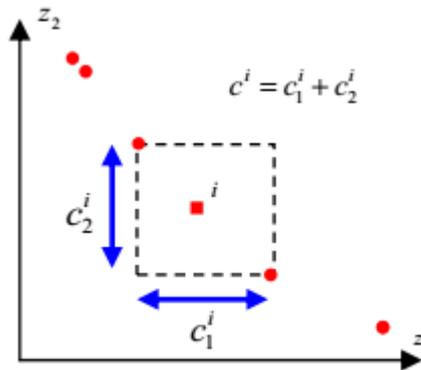
De forma a garantir a diversidade dos indivíduos não-dominados, o NSGA-II emprega o cálculo da distância de multidão (3-2). Trata-se da média da distância das soluções adjacentes a um dado indivíduo para todos os objetivos considerados (3-3). (YU e GEN, 2010).

$$c^i = \sum_{k=1}^m c_k^i \quad (3-2)$$

$$c_k^{|j|} = \frac{f_k^{[j+1]} - f_k^{[j-1]}}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \quad (3-3)$$

A Figura 3-10 revela graficamente como essas distâncias são medidas. A vantagem do cálculo da distância de multidão diante de outros métodos que o antecederam reside no fato de não ser necessário a determinação de outros parâmetros além dos valores dos objetivos para cada indivíduo.

Figura 3-10: Representação gráfica da distância de multidão

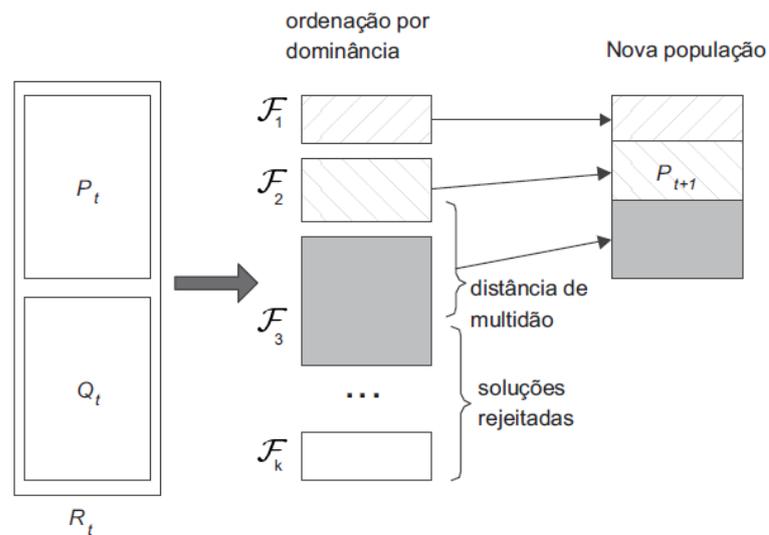


Fonte YU e GEN (2010)

### 3.5.2. Determinação da nova população

O NSGA-II aplica a ordenação por não-dominância junto com a distância de multidão para gerar os descendentes que vão formar a nova população. A Figura 4.8 mostra o procedimento completo em uma geração (iteração).

Figura 3-11: Constituição da nova população para o NSGA-II



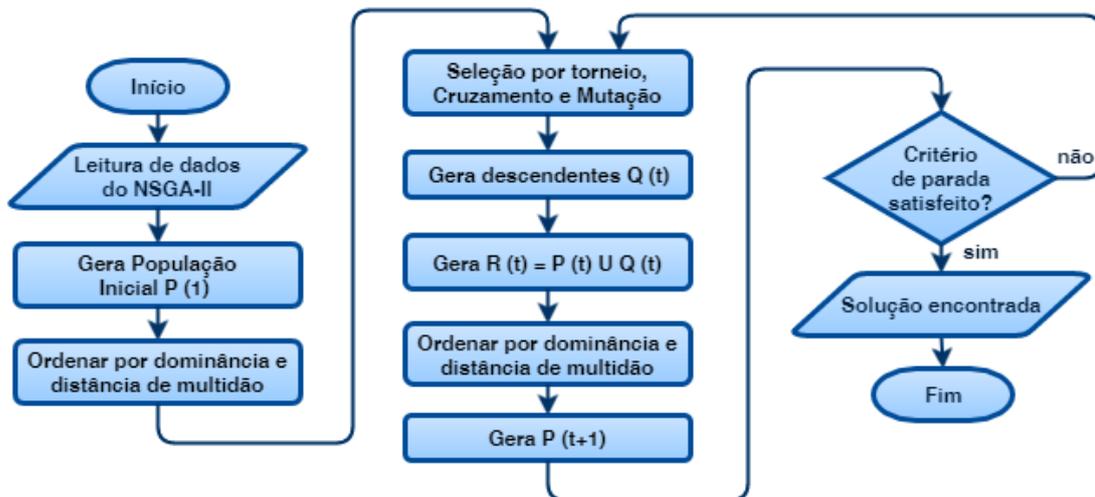
FONTE: TICONA e DELBÉM, 2008

A partir da população  $P_t$  de tamanho  $N$ , os indivíduos são ordenados por não-dominância e em seguida submetidos aos operadores genéticos clássicos: seleção (torneio), cruzamento e mutação. Esse procedimento dá origem à prole  $Q_t$ , também de tamanho  $N$ . Uma nova população  $R_t$  é criada a partir da união entre  $P_t$  e  $Q_t$ . Essa população, de dimensão  $2N$ , é ordenada novamente por não-dominância e classificada em fronteiras.

A constituição da nova população  $P_{t+1}$ , que será levada à próxima geração perpassa pela avaliação da aptidão dos indivíduos da população  $R_t$ . O primeiro critério leva em consideração os melhores indivíduos, aqueles que pertencem à fronteira 1. Avalia-se se a quantidade desses indivíduos é maior que  $N$ . Sendo maior, procede-se o cálculo da distância de multidão para selecionar aqueles que passarão à próxima geração. Caso contrário, todos os indivíduos da fronteira 1 comporão a nova população.

Procede-se da mesma maneira com as próximas fronteiras até uma dada fronteira  $F_x$ , cujos indivíduos, se tomados em sua totalidade, excederão o total de  $P_{t+1}$ . A partir daí, realiza-se o cálculo da distância de multidão, escolhendo os indivíduos com os maiores resultados nesse parâmetro para completar  $P_{t+1}$ . Esse mecanismo favorece as primeiras fronteiras, estabelecendo um caráter elitista ao NSGA-II. Na Figura 3-12 temos o fluxograma do NSGA-II.

Figura 3-12: Fluxograma do NSGA-II.



### 3.6. Conclusões

Este capítulo teve como objetivo apresentar os conceitos necessários para desenvolver o algoritmo de otimização multiobjetivo utilizado neste trabalho. O NSGA-II tem como base o algoritmo genético e tratou-se de apresentar a técnica que é base para a utilização da referida técnica MO.

Além disso discutiu-se a vantagem da utilização das técnicas multiobjectivo frente as mono-objetivo devido ao fato de que a resposta é formada por um conjunto de soluções que envolvem relações de *trade-off* (Soluções de Pareto) que o usuário do de escolher qual melhor se adequa a sua realidade.

Agora passa-se a descrever o problema de alocação de bancos de capacitores em redes de distribuição de energia elétrica sob a ótica multiobjetivo, sendo que serão utilizados como funções objetivos os custos de instalação somados as perdas no sistema com o intuito de minimiza-los, assim como a segunda função objetivo que está relacionada a qualidade do fornecimento da tensão entregue aos consumidores. Vale ressaltar que esta problematização está sujeita aos limites operacionais dos bancos de potência estabelecidos no capítulo anterior. Essas funções objetivos serão otimizadas pelo NSGA-II que será proposto a seguir para atender as peculiaridades do problema a ser descrito.

# **CAPÍTULO 4. PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO PARA ALOCAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES PELO NSGA-II**

## **4.1. Introdução**

Neste capítulo é formulado o Problema de Alocação de Bancos de Capacitores (PABC) que será usado como base para a formulação das metodologias utilizadas neste trabalho. O PABC é formulado através da ótica MO, ou seja, são apresentadas as duas funções objetivos que serão otimizadas pelo NSGA-II proposto neste trabalho para otimizar o problema.

## **4.2. Problema de Alocação de Banco de Capacitores sob a ótica MO**

Tem sido notório nos últimos anos o crescimento dos grandes centros urbanos e, frente aos consumidores cada vez mais exigentes quanto a qualidade do serviço prestado e de uma legislação cada vez mais estreita, as concessionárias de distribuição de energia elétrica estão enfrentando grandes desafios no que se refere à continuidade do fornecimento de energia. Por este motivo, a instalação de bancos de capacitores em pontos estratégicos na Rede de Distribuição Urbana (RDU), visando, dentre outros, a melhoria no nível de tensão nos barramentos, melhoria no fator de potência e a compensação de reativos, tem sido largamente adotada.

Métodos de otimização passaram a ser utilizados para alocação dos bancos de capacitores e NEAGLE e SAMSON (1956) são os pioneiros nas pesquisas envolvendo a alocação ótima de Bancos de Capacitores (BC's). No entanto, seus trabalhos eram muito incipientes, pois assumiam muitas condições ideais (como é o caso da carga uniformemente distribuída). A partir daí, desenvolveram-se muitos trabalhos, os quais retratam o uso de Inteligência Artificial, Algoritmos Genéticos, Sistemas Especialistas, entre outros podem-se citar: CHIOU e CHANG (2013), MUTHUKUMAR e JAYALITHA (2013) e HAKIMI *et al* (2010).

Um outro desafio que se impõe com o crescimento das cargas nas redes de distribuição é a crescente inserção de cargas não lineares as quais produzem harmônicos, em geral indesejáveis, criando uma série de problemas, tais como, avarias em aparelhos eletrônicos, erro em transmissão de dados e superaquecimentos de elementos da rede elétrica (como é o caso do transformador), dentre outros

Trabalhos como DAVUDI *et al* (2011), VIDMAR (2012), EAJAL e EL-HAWARY(2010), e ESMAEILIAN e FADAEINEDJAD (2013) tratam o problema da alocação ótima de bancos sob uma nova perspectiva, em que a presença de harmônicos é modelada segundo uma restrição da função objetivo.

Para projetos de planejamento de redes de distribuição uma das funções objetivos será representada através dos custos a serem investidos em conjunto com os seus benefícios econômicos. Os investimentos para a instalações de capacitores e manutenção dos mesmos devem justificar um retorno do investimento para as concessionárias. Este tipo de projeto é economicamente viável, pois a compensação de potência reativa através de capacitores resulta em vários benefícios técnicos (mencionados anteriormente) e econômicos, como por exemplo, a redução das perdas técnicas e os consequentes ganhos pelo aumento das vendas de energia (SALAS, 2010).

Nesse sentido, para este trabalho, precisa-se calcular os investimentos para as instalações dos BC's e as perdas de potência ativa após a instalação dos mesmos.

O custo adotado para os preços dos BC's foi de 4 US\$/kVAr ( $k_a$ ) já inseridos os custos de manutenção, sendo que foram considerados configurações de células capacitivas de 300, 600 e 1200 kVAr. Desta forma, para cada barra, supôs-se 4 possíveis configurações: com um banco de 300 kVAr, ou com um banco de 600 kVAr, ou com um banco de 1200 kVAr ou sem a instalação de BC's. Cada barra do sistema de distribuição tem quatro possíveis custos de investimentos apresentados na Tabela 4-1:

Tabela 4-1: Configurações e preços dos bancos de capacitores considerados

Banco	Custo
0 kVAr	0
300 kVAr	1200 US\$
600 kVAr	2400 US\$
1200 kVAr	4800 US\$

Com o intuito de generalizar o custo de instalação necessário para implementar uma solução de BC's instalados na rede primária de distribuição foi adotada a equação (4-1).

$$CBC = k_a \sum_{m=1}^{N_b} (C_b) \quad (4-1)$$

Onde:

$CBC \rightarrow$  Custo com banco de capacitores

$k_a \rightarrow$  constantes que indicam o custos unitários dos bancos

$C_b \rightarrow$  Potência dos bancos de capacitores individualmente

$N_b \rightarrow$  número máximo de barras

$N_b$  é o subconjunto de barras candidatas a alocar BC que está contido no conjunto do número total de barras,  $N$ , da RDU.

A vida útil estimada pelos fabricantes de capacitores é de 20 anos para os bancos de média tensão desde que os mesmos operem respeitando os limites máximos de operação recomendados pela norma IEEE 1036-2010, mencionados no CAPÍTULO 2.

Um dos objetivos desse trabalho é garantir que o projeto de compensação capacitiva a ser adotado pela concessionária de energia elétrica seja um projeto de 20 anos, ou seja, que os bancos instalados operem dentro dos limites para os quais foram projetados, conseqüentemente trazendo o maior retorno possível aos investimentos realizados na rede de distribuição urbana de energia elétrica (RDU).

Deve-se ressaltar que o preço da tarifa de energia elétrica foi considerado invariável assim como a demanda dos consumidores foi considerada constante no período de estudo. Adicionalmente, desconsidera-se o efeito da inflação, sendo este fator muito difícil de prever. Entretanto, não considerar estes aspectos torna a formulação como sendo conservadora (SALAS, 2010).

O custo da energia adotado neste trabalho foi de 0,07 US\$/kWh ( $k_b$ ), sendo o mesmo calculado levando em consideração as tarifas diferenciadas para os horários de ponta e fora de ponta, mas não a sazonalidade dos períodos do ano (seco e úmido).

Neste presente trabalho, não levou-se em consideração os ganhos obtidos com o aumento da demanda de potência ativa disponibilizada pela solução de BC's instalados na RDU uma vez que, como mencionado anteriormente, as demandas dos consumidores são consideradas constantes no período de estudo.

Assumindo que a perda ativa na frequência fundamental é dada por  $P_f$  e as perdas ativas nas frequências harmônicas por  $P_h$ , então o custo com energia (CE) a ser minimizado no período de investimento é dado por:

$$CE = k_b \sum_{n=1}^{N_b-1} (P_f + P_h) \quad (4-2)$$

Para o cálculo de  $P_f$  faz-se uso do fluxo de carga via método do somatório de correntes o qual apresenta uma fácil implementação sem, contudo, perder a confiabilidade e robustez. As equações (4-3) e (4-4) determinam a soma das correntes nos ramos no sentido inverso, ou seja, das barras de maior para as de menor índice, enquanto a equação (4-5) realiza a estimativa das tensões no caminho direto (partindo da subestação para as barras terminais) a cada iteração.

$$I_k = \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} \quad (4-3)$$

$$I_{km} = \sum_{j=1}^J I_{mj} + I_k \quad (4-4)$$

$$V_m = V_k - I_{km} Z_{km} \quad (4-5)$$

Onde:

$I_k$  → Corrente complexa da barra k

$V_k, V_m$  → Tensão na barra

$P_k$  → Potência ativa na barra k

$Q_k$  → Potência reativa na barra k

$I_{km}, I_{mj}$  → Corrente complexa na linha

$Z_{km}$  → Impedância na linha

As perdas ativas do sistema, (4-6), são importantes na determinação do critério de parada.

$$P_{km} = I_{km}^2 Z_{km} \quad (4-6)$$

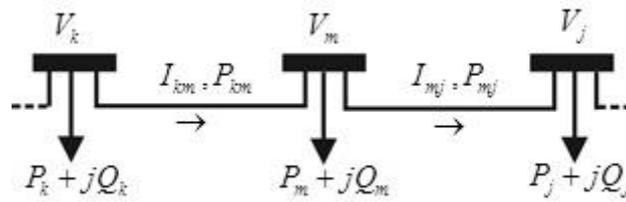
Onde:

$P_{km}$  → Potência ativa na barra

Para um melhor entendimento, as equações supracitadas são obtidas através da análise de Kirchhoff, podendo ser presumidas através de um trecho genérico composto de 3 barras (k, m

e j), conforme a Figura 4-1. Nota-se que as correntes circundantes em uma linha k-m, são obtidas a partir da soma da corrente sobre a carga atrelada a barra ‘m’ e de todos os ramos m-j conectados diretamente à ‘m’. Para o caminho direto, as tensões nas barras são obtidas pela queda de tensão provocada ao longo de cada linha, a partir da subestação. Repete-se o algoritmo até que a diferença das perdas nas linhas entre duas iterações consecutivas seja menor que um valor pré-estabelecido.

Figura 4-1: Modelo genérico de linha usado no método do somatório de correntes



Logo  $P_f$  será calculada pela equação (4-7) que é a soma de todas as perdas obtidas em todos os ramos da RDU em estudo.

$$P_f = \sum_{k=1}^{N_b} \sum_{m=1}^{N_b} P_{km} \quad (4-7)$$

Já para efetuar o cálculo de  $P_h$  na equação (4-2), deve-se efetuar o cálculo do fluxo de carga de componentes harmônicos em sistemas de distribuição. Para isto existem diferentes métodos, cada um com uma dada especificidade, os quais se subdividem em métodos diretos e em métodos iterativos. Neste trabalho, como não se objetiva maior acurácia e perfil harmônico detalhado ao longo da rede, faz-se o uso do método de injeção de correntes. Trata-se de um método direto em que é resolvida a equação (4-8) (ARRILAGA e ARNOLD, 1990, e ARRILAGA *et al* 1983) tantas vezes quanto for o número de harmônicos presentes no sistema, isto é, para cada frequência harmônica, modela-se o sistema e efetua-se o cálculo referido por (4-8).

$$\begin{aligned} [I_h] &= [Y_h][V_h] \\ &\vdots \quad \vdots \quad \vdots \\ [I_3] &= [Y_3][V_3] \\ [I_2] &= [Y_2][V_2] \end{aligned} \quad (4-8)$$

Onde  $[Y_h]$  é a matriz admitância obtida para a frequência 'h'. O vetor de correntes  $[I_h]$  é composto pelas correntes harmônicas advindas dos modelos dos elementos não-lineares que compõem o sistema de distribuição, os quais podem ser encontrados em IEEE *Task force on Harmonics Modeling and Simulation* (1996).

No que diz respeito às cargas não lineares utilizadas, um perfil geral do modelo de correntes pode ser visualizado na Tabela 4-2. Tais modelos foram extraídos dos estudos de MILLER (1999) e DAVUDI *et al* (2011). Os modelos representam um retificador de 6 pulsos (típico da composição de *choppers*, inversores e outros), um TCR (comumente utilizado no chaveamento de BC's) e outras cargas não lineares genéricas. Depreende-se da Tabela 4-2 que as componentes harmônicas analisadas neste trabalho são as de 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup>, 13<sup>a</sup> e 17<sup>a</sup> ordens.

Tabela 4-2: Características das cargas não lineares

Ordem	Retificador 6 pulsos		TCR		Outros	
	Mod.	Ang.	Mod.	Ang.	Mod.	Ang.
1	100%	-49.56°	100%	46.92°	100%	0°
5	19.41%	-67.77°	7.02%	-124.4°	18.24%	-55.6°
7	13.09%	11.90°	2.50%	-29.87°	11.90%	-84.1°
11	7.58%	-7.13°	1.36%	-23.75°	5.73%	-143.56°
13	5.86%	68.57°	0.75%	71.50°	4.01%	-175.68°
17	3.79%	46.53°	0.62%	77.12°	1.93%	111.39°

FONTE: Adaptado de MILLER, 1999.

O modelo matemático base do PABC, considerando cargas balanceadas, foi proposto por BARAN e WU (1989), e representa um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM), com função objetivo não diferenciável. Este problema se caracteriza por apresentar o fenômeno da explosão combinatória conforme o número de barras do sistema. Para formular o PABC sob a ótica multiobjetiva com a inserção de restrições harmônicas foram adotadas duas funções objetivos a ser otimizada pela metaheurística.

$$\min F_1 = k_a \sum_{m=1}^{N_b} (C_b) + k_b \sum_{n=1}^{N_b-1} (P_f + P_h) \quad (4-9)$$

$$\min F_2 = \max \|V_{REF} - \vec{V}_j\| \quad (4-10)$$

Onde,

- $F_1, F_2$  → Objetivos;
- $k_a, k_b$  → Constantes que indicam o custo unitário dos bancos e do kWh em um determinado tempo, respectivamente;
- $C_b$  → Potências dos bancos de capacitores individualmente;
- $P_f$  → Perdas ativas na frequência fundamental;
- $P_h$  → Perdas ativas nas frequências harmônicas;
- $N_b$  → Número máximo de barras;
- $V_{REF}$  → Tensão de referência;
- $V_j$  → Tensão em cada barra;

Na equação (4-9) que é a primeira função objetivo, o primeiro termo é dado pela equação (4-1) que representa o custo de aquisição, instalação e manutenção dos bancos de capacitores fixos em função das suas respectivas potências nominais. Observa-se que estes termos são de natureza discreta e não diferenciável pois representam BC's padronizados pelas indústrias. A segunda parcela é formada pela equação (4-2) que representa o custo com energia composta pelas perdas ativas nas linhas (tanto na frequência fundamental quanto nas frequências harmônicas).

A segunda função objetivo, (4-10), tem o objetivo de minimizar o módulo da máxima variação de tensão entre a  $V_{REF}$  (1 p.u., ou seja, a tensão contratada pelo consumidor), e a tensão em cada barra do sistema ( $V_j$ ). Ao minimizar-se a máxima variação desta diferença o algoritmo busca soluções em que todas as barras do sistema apresentem os valores mais próximos possíveis da  $V_{REF}$ . Ao inserir o módulo na equação (4-10), retira-se do PABC uma análise qualitativa em afirmar que o pior caso dentre todas as barras apresenta sub ou sobretensão.

A formulação deste segundo objetivo é motivada pela necessidade das concessionárias de energia elétrica efetuarem a manutenção dos níveis de tensão nas barras os quais devem estar dentro dos limites estabelecidos pelo Art. 5º da Resolução 505/2001 da ANEEL o qual rege:

“Art. 5º Para unidades consumidoras atendidas em tensão superior a 1 kV, a tensão a ser contratada com a concessionária deve situar-se entre 95% (noventa e cinco por cento) e

105% (cento e cinco por cento) da tensão nominal do sistema no ponto de entrega ou de conexão ...”

A seguir é proposta a metaheurística para a resolução do PABC multiobjetivo.

### 4.3. Factibilidade das soluções

No AG proposto a ferramenta necessária para o cálculo das funções objetivos  $F_1$  e  $F_2$ , equações (4-9) e (4-10), e das violações das restrições de desigualdades (infectíveis), é o fluxo de carga. Todos os valores foram registrados, tanto na frequência fundamental quanto nas suas harmônicas através de matrizes multidimensionais em todas as iterações do algoritmo e foram utilizados com diferentes objetivos.

As restrições de desigualdades são divididas em dois grupos:

- i. por violação dos limites de tensão;
- ii. por violação dos limites que envolvem a injeção de harmônicos e/ou violação do limite estabelecido pelas cartas de ressonância.

Para o grupo (i) deve-se resolver os fluxos de carga sem levar em conta a restrição de tensão e se verifica se as tensões em todas as barras estão dentro dos limites estabelecidos pela Resolução 505/2001 da ANEEL, ou seja:

$$0,95 \leq V_j \leq 1,05 p.u \quad (4-11)$$

Caso uma ou mais barras estejam fora dos limites de tensão da equação (4-11) esta solução é considerada infectível e, em seguida, é armazenada em vetor específico. Todos os demais dados provenientes dos cálculos das funções objetivos e fluxos de carga são descartados das matrizes que armazenam os valores factíveis e substituídos através do algoritmo de substituição que para a população inicial é substituído aleatoriamente e nas demais através da seleção e da atuação dos operadores genéticos.

O segundo grupo de restrição (ii) depende de cada um dos três cenários que são:

#### 4.3.1. Cenário 01

A IEEE 519-2014 aponta a ressonância harmônica como um dos principais causadores do aumento de distorção harmônica nos sistemas de distribuição e com o intuito de mitigar este

fenômeno estabelece os limites dos níveis aceitáveis de tensão e distorção harmônica em cada barra. Portanto, para atender a norma deve-se inserir ao PABC as restrições de Distorções Harmônicas de tensão ( $THD_v$ ) e as Distorções Harmônicas Individual de tensão ( $IHD_v$ ) como parâmetros de ressonância harmônica.

Essas restrições aos níveis de distorções na forma de onda da tensão foram inseridas no PABC proposto como duas restrições de desigualdades dadas pelas inequações (4-12 e (4-13:

$$THD_v \leq 5\% \quad (4-12)$$

$$IHD_v \leq 3\% \quad (4-13)$$

#### 4.3.2. Cenário 02

A IEEE 1036-2010 estabelece os limites de operações dos bancos de capacitores que em conjunto com o Índice de Ressonância definido por HUANG *et al* (2003) calcula a severidade do fenômeno da ressonância harmônica nos bancos de capacitores de potência.

Dessa forma as quatro inequações apresentadas no item 2.6.2 foram inseridas no PABC proposto nesta dissertação como quatro restrições de desigualdade como segue:

$$\sqrt{1 + \sum_n \left( \frac{\alpha_n RI_n}{n} \right)^2} \cdot \sqrt{1 + \sum_n (\alpha_n RI_n)^2} \leq 135\% \quad (4-14)$$

$$\sqrt{1 + \sum_n \left( \frac{\alpha_n RI_n}{n} \right)^2} \leq 110\% \quad (4-15)$$

$$1 + \sum_n \left( \frac{\alpha_n RI_n}{n} \right) \leq 120\% \quad (4-16)$$

$$\sqrt{1 + \sum_n (\alpha_n RI_n)^2} \leq 180\% \quad (4-17)$$

### 4.3.3. Cenário 03

O Cenário 03 analisado neste trabalho nada mais é que a junção dos dois cenários anteriormente descritos, logo as restrições de desigualdades são dadas pela inequações (4-13)(4-14), (4-15), (4-16) e (4-17).

## 4.4. Solução através do NSGA-II proposto

O algoritmo multiobjetivo evolucionário proposto para resolver o problema formulado anteriormente é o *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II), (DEB *et al*, 2000), baseado em uma ordenação elitista por dominância (fronteiras de Pareto). Esse procedimento consiste em classificar as soluções de um conjunto  $M$  em diversas fronteiras  $F_1, F_2, \dots, F_k$  conforme o grau de dominância de tais soluções. Assim, a fronteira  $F_1$  contém as soluções não-dominadas de todo o conjunto  $M$ . A fronteira  $F_2$  possui as soluções que são dominadas somente por  $F_1$ ;  $F_3$  contém as soluções dominadas por  $(F_1 \cup F_2)$  e assim sucessivamente.

Como mencionado no primeiro capítulo o NSGA-II foi utilizado com sucesso no planejamento de sistemas elétricos de potência, cujo uso vai além do controle de reativos e perdas no sistema através da instalação ótima de BC's, visando também a manutenção da confiabilidade da rede, propondo a melhoria de condições de operação do sistema de distribuição bem como a confiabilidade do mesmo através da instalação ótima de chaves e religadores na rede. Consequentemente, surgiu a motivação para aplicar este método para solucionar o problema.

Também, foi mencionado no CAPÍTULO 3 que o algoritmo genético (AG) é um algoritmo da categoria dos evolucionários do qual o NSGA-II foi derivado. Portanto passa-se a dar atenção especial a esta metaheurística.

### 4.4.1. Algoritmo genético proposto

As principais etapas do AG são: codificação, seleção, cruzamento e mutação. A codificação é a representação da solução ao problema. Neste trabalho as soluções, ou seja, as barras em que estão sendo instalados e a capacidade dos bancos de capacitores, são representadas por codificação binária para as potências dos BC's e os locais de instalação são dadas pela posição

em que aparecem no vetor de codificação. Cada indivíduo é um vetor de barras candidatas a alocar capacitores com as respectivas potências.

O método de seleção dos indivíduos foi por torneio, o cruzamento do tipo um ponto de corte e a mutação bit a bit de acordo com DEB (2001). Devida a natureza do PABC, faz-se uma intervenção ao AG tradicional uma vez que a mutação bit a bit pode alterar a restrição de igualdade do problema. Essa restrição parte do pressuposto que em uma barra qualquer já esteja instalado um banco de capacitor e esta condição não deve ser alterada pelos operadores genéticos. Neste trabalho existe uma restrição de igualdade que consiste na barra 01 que é uma barra com tensão controlada (barra PV), portanto o algoritmo não permite a instalação de banco de capacitores nesta barra, quer sejam as soluções geradas aleatoriamente no início do NSGA-II, ou pela atuação da mutação.

Outra característica especial deste AG proposto é que cada solução inactível para o problema é substituída pelo algoritmo, ou seja, é realizada uma nova seleção e aplicados os operados genéticos até que esta solução seja factível para o problema. Todas as soluções não factíveis são armazenadas e contabilizadas durante a programação através de vetores e variáveis de controle específicos para que as mesmas possam ser analisadas posteriormente. Somente quando todas as soluções são factíveis é que o AG é finalizado.

A seguir são detalhados os principais passos do algoritmo genético proposto.

#### 4.4.1.1. Codificação

A forma de codificação utilizada no problema é a codificação binária das variáveis que representam a potência dos bancos que operam em cada barra da RDU. Da Tabela 4-1 temos três opções de potências padrões e custos dos capacitores fixos de média tensão (13,8 kV), mais utilizados pelas concessionárias no Brasil. Segundo esta Tabela estas potências correspondem a ausência de bancos, 300, 600 e 1200 kVAr as quais foram codificadas segundo a Tabela 4-3:

Tabela 4-3: Configurações e custos dos bancos de capacitores considerados

Codificação Binária	Potência	Custo
00	Sem banco	0
01	300 kVAr	1200 US\$
10	600 kVAr	2400 US\$
11	1200 v	4800 US\$

Uma palavra binária de dois bits foi suficiente para representar as quatro opções possíveis de potência de BC para cada barra do sistema. A Figura 4-2 exemplifica a codificação de bancos em uma rede primária de 07 barras.

Figura 4-2: Vetor de codificação de uma solução do algoritmo genético

Barra 01	Barra 02	Barra 03	Barra 04	Barra 05	Barra 06	Barra 07
00	00	01	00	11	00	10

A palavra binária utilizada no problema depende diretamente do número de barras da RDU a ser planejada, para ser mais preciso, o número de bits será  $2N_b$ . Como no exemplo da Figura 4-2 tem-se um sistema com sete barras, logo a palavra binária terá 14 bits. Esta palavra codifica uma única solução dentre todas as combinações possíveis que podem haver para o sistema. Caso não haja nenhuma restrição para alocação de BC em qualquer barra do sistema, o número máximo de combinação pode ser facilmente calculado por  $4^{N_b}$ , ou seja, para um pequeno sistema de 7 barras tem-se 16.384 soluções possíveis. E é obvio que a complexidade do problema aumenta exponencialmente com o tamanho do sistema, caracterizado como de explosão combinatória, mencionado anteriormente.

No exemplo em análise, a solução codificada representa três BC's instalados nas barras 03, 05 e 07, cujas potências são respectivamente 600, 1200, e 300 kVAr, a um custo de implementação de US\$ 8.400,00.

#### 4.4.1.2. Geração da população inicial

A população inicial é gerada de forma aleatória, considerando todas as barras da rede como candidatas à alocação de BC, com exceção da barra 01 por se tratar de uma barra PV. Entretanto, existe a possibilidade de se adicionar outras restrições de igualdade ao problema, como por exemplo um BC previamente instalado na rede ou outras barras onde não sejam permitidas a alocação por parte das concessionárias de energia, como no caso de trechos monofásicos por serem trechos curtos ou pouco carregados, podendo apresentar problemas de sobretensão. Para obedecer a restrição de igualdade do problema força-se as mesmas na

população gerada aleatoriamente, ou seja, os dois primeiros *bits* sempre serão a palavra binária 00.

Além disso, todas as soluções devem ser factíveis ao problema, ou seja, devem obedecer às demais restrições de desigualdade propostos em cada um dos cenários a serem estudados. Caso uma solução seja infactível é gerada uma nova aleatoriamente até que seja factível.

#### **4.4.1.3. Seleção**

O método de seleção dos indivíduos é o torneio binário, no qual dois indivíduos da população são escolhidos aleatoriamente e comparados para escolher qual deles vai gerar descendentes na nova população. Essa comparação é realizada através da aptidão dos indivíduos que no NSGA-II pode assumir dois valores distintos (que não podem ser confundidos com os dois objetivos) e, nesta proposta, sempre o indivíduo mais apto é selecionado pelo torneio. Uma solução  $i$  é escolhida sobre uma solução  $j$  se:

- a)  $i$  possui uma fronteira menor que  $j$ .
- b) Se ambas soluções estão na mesma fronteira e  $i$  possui um maior valor para a distância de multidão que  $j$ .

Essa alteração precisou ser implementada dentro do AG tradicional para que seja garantida a diversidade das soluções para a próxima geração, pois no caso de ambas estarem na mesma fronteira, será selecionada a que apresentar maior distância de multidão, ou seja, estiver mais distante das soluções vizinhas na fronteira.

#### **4.4.1.4. Cruzamento**

O cruzamento implementado foi um ponto de corte, que é o mesmo feito por DEB (2001), no qual um ponto de cruzamento é selecionado aleatoriamente em ambos os progenitores. Todo o material genético após este ponto é permutado resultando na descendência. A taxa de cruzamento utilizada foi de 0,9.

Como mencionado no CAPÍTULO 3 a representação binária exige um esforço computacional maior, que pode ser diminuído com a programação de baixo nível proporcionada pela implementação das rotinas do AG através de operações binárias (ÁVILA, 2006). Para isto utilizou-se a álgebra booleana e redução por mapa de Karnaugh para obter uma expressão para o cruzamento por um ponto de corte. Esta expressão somente pode ser aplicada com a criação

de um vetor auxiliar (vetor corte), no qual os bits menos significativos possuem valores binários 1 para o material genético que irá sofrer a permutação. Logo a expressão booleana para os descendentes será:

$$\begin{aligned} D_1 &= P_1 \cdot \bar{C} + P_2 \cdot C \\ D_2 &= P_1 \cdot C + P_2 \cdot \bar{C} \end{aligned} \quad (4-18)$$

Onde:

$D_1, D_2 \rightarrow$  descendente 1 e 2

$P_1, P_2 \rightarrow$  progenitor 1 e 2

$C \rightarrow$  vetor de corte

$\bar{C} \rightarrow$  negação do vetor de corte

$\cdot \rightarrow$  produto lógico (operador E)

$+ \rightarrow$  soma lógica (operador OU)

Foram realizados testes com outros tipos de cruzamento, entretanto o que funcionou melhor foi de um ponto, uma vez que permitem manter a factibilidade dos indivíduos.

#### 4.4.1.5. Mutação

A mutação utilizada é a bit a bit, na qual cada alelo tem uma probabilidade de ter seu valor invertido. Nesta dissertação a taxa de mutação ( $t_m$ ) utilizada é de  $1/\text{alelos}$ . Explanou-se que a quantidade de alelos é dada pelo dobro do número de barras de uma RDU, logo:

$$t_m = \frac{1}{2N_b} \quad (4-19)$$

Pela equação (4-19) tem-se que quanto maior o sistema menor será a probabilidade de um bit sofrer mutação. O objetivo central de sua atuação é manter um nível adequado de diversidade na população, garantindo que um alelo que eventualmente desapareça tenha a possibilidade de reaparecer aleatoriamente. Como será visto mais adiante o sistema utilizada como teste possui 34 barras, para todos os efeitos  $t_m = 1,47\%$ .

Assim como na recombinação, utiliza-se a álgebra booleana na programação deste operador genético. De forma similar a recombinação utiliza-se um vetor auxiliar (vetor mutação), de mesma dimensão do cromossomo, no qual é feito um teste lógico entre seus bits

e a ocorrência do bit 1 tem a mesma probabilidade da taxa de mutação. Desta forma se obtém a seguinte expressão booleana para a mutação bit a bit, que nada mais é que uma soma binária sem resto:

$$S = E \cdot \bar{M} + \bar{E} \cdot M \quad (4-20)$$

Onde:

- $S$  → cromossomo de saída após mutação
- $E$  → cromossomo de entrada antes da mutação
- $M$  → vetor mutação
- $\bar{E}, \bar{M}$  → operadores booleano negação
- $\cdot$  → produto lógico (operador E)
- $+$  → soma lógica (operador OU)

Com a implementação das expressões booleanas (4-19) e (4-20), observa-se o aumento no desempenho do AG proposto. Dessa forma, tem-se implementado a rotina do AG, que passa a ser uma sub-rotina do NSGA-II proposto.

#### 4.4.2. Ordenação por Dominância:

Como mencionado anteriormente o NSGA-II é uma metaheurística baseada em uma ordenação elitista por dominância entre os seus objetivos (O). O procedimento de ordenação por não-dominância proposto por DEB *et al* (2000) primeiro necessita que para cada solução sejam calculados dois termos:

- $nd_p$ , o número de soluções que dominam a solução  $p$  (contador de dominação);
- $D_p$ , o conjunto de soluções que são dominadas pela solução  $p$ .

Para isso são necessárias  $ON^2$  (onde: N é o tamanho da população; O é a quantidade de objetivos) comparações. O procedimento de ordenação por dominância é mostrado na Figura 4-3. A primeira metade do algoritmo calcula tais valores para as soluções em M. As soluções com  $nd_i = 0$ , são classificadas na primeira fronteira ( $F_1$ ).

Em seguida o algoritmo percorre o conjunto de soluções dominadas  $D_i$  para cada solução pertencente a  $F_1$ . O contador de soluções  $nd_j$  de cada solução j em  $D_i$  é diminuído em 1. Se  $nd_j = 0$ , então a solução j será classificada como pertencente a fronteira, neste caso,  $F_2$ . Esta iteração é repetida até que todas as soluções estejam classificadas em uma fronteira. A Figura 3-5 ilustra este procedimento aplicado a soluções que minimizam duas funções objetivos ( $f_1$  e  $f_2$ ).

Figura 4-3: Algoritmo para a ordenação por dominância do NSGA-II

---

**Algoritmo 01: Ordenação por Dominância**

---

```

Entrar com o conjunto de soluções a serem ordenadas ( $M$ );
Inicializar a primeira fronteira ( $F_1 = \emptyset$ );
Inicializar o contador de fronteiras ( $fronts = 1$ )
for  $i \leftarrow 1$  to (QUANTIDADE DE SOLUÇÕES DE  $M$ ) do
    Inicializar o contador de dominação da solução ( $nd_i = 0$ );
    Inicializar o conjunto de soluções que são dominadas pela solução ( $D_i = \emptyset$ );
    for  $j \leftarrow 1$  to (QUANTIDADE DE SOLUÇÕES) do
        if  $j \neq i$  then
            if a solução  $i$  domina a solução  $j$  then adicionar  $j$  ao conjunto de soluções dominadas por  $i$ 
                ( $D_i = D_i \cup \{j\}$ );
            elseif a solução  $j$  domina a solução  $i$  then incrementar o contador de dominação de  $i$ 
                ( $nd_i = nd_i + 1$ );
        if  $nd_i = 0$  then a solução  $i$  pertence a primeira fronteira ( $F_1 = F_1 \cup \{i\}$ )
    while  $F_{fronts} \neq \emptyset$  do
        Inicializar o conjunto Temporário ( $Temp = \emptyset$ );
        for  $i \leftarrow 1$  to (QUANTIDADE DE SOLUÇÕES DE  $F_{front}$ ) do
            for  $j \leftarrow 1$  to (QUANTIDADE DE SOLUÇÕES DE  $D_i$ ) do
                 $nd_j = nd_j - 1$ ;
                if  $nd_j = 0$  then a solução  $j$  pertence a próxima fronteira ( $Temp = Temp \cup \{j\}$ )
             $fronts = fronts + 1$ ;
         $F_{fronts} = Temp$ ;
Sair com as soluções de  $M$  classificadas em fronteiras:  $F = F_1, F_2, \dots, F_{fronts}$ 

```

---

#### 4.4.3. Elitismo para as soluções não-dominadas

O algoritmo NSGA-II trabalha com duas populações, denotadas como  $P$  e  $Q$  de tamanho  $N$ . Na primeira geração, os indivíduos gerados aleatoriamente da população  $P_1$ , geram as soluções em  $Q_1$  através do AG proposto em 4.4.1. Em seguida é formada a população combinada  $R_1 = P_1 \cup Q_1$ . A população  $R$  tem tamanho  $2N$ . Então a população  $R$  é ordenada por dominância através do Algoritmo 01. Uma vez que os membros da população atual e passada são incluídos em  $R$  o elitismo é aplicado, pois é estabelecido um processo competitivo para preencher as  $N$  vagas da próxima geração, nesse caso,  $P_2$ . As soluções não-dominadas pertencentes a primeira fronteira ( $F_1$ ) da população combinada são as melhores entre todas as soluções em  $R$ , e são encaminhadas para a próxima geração (elitismo). Se o tamanho de  $F_1$  for menor que  $N$ , os

membros remanescentes da próxima geração são preenchidos pelo conjunto de solução da segunda fronteira e, assim, sucessivamente até que se tem exatamente N soluções na próxima geração.

#### 4.4.4. Distância de Multidão

Seguindo o algoritmo para a criação da próxima geração, se o conjunto de soluções da fronteira ultrapassar as vagas remanescentes elas serão preenchidas pelas soluções que tiverem a maior Distância de Multidão que nada mais é que a média das distâncias das duas soluções adjacentes de cada indivíduo para todos os objetivos.

A distância de multidão é o principal operador que garante não somente a diversidade das soluções, mas também o seu espalhamento através da primeira fronteira a medida que o algoritmo converge e o número de soluções que são classificadas na primeira fronteira ultrapassa o tamanho da próxima geração. A Figura 4-4 mostra os passos a se seguir para calculá-la.

A Figura 3-10 ilustra o cálculo da distância de multidão para dois objetivos. O procedimento é também aplicado para funções com mais de dois objetivos. Do algoritmo 02 depreende-se também que o cálculo é realizado pelos valores ponderados entre os diversos objetivos. Por fim, percebe-se facilmente que os extremos da fronteira são sempre preservados, pois assumem valores  $\infty$ , uma vez que as soluções que apresentam os maiores valores para as distâncias de multidão passarão a ocupar as vagas remanescentes da próxima geração.

Figura 4-4: Algoritmo para o cálculo da distância de multidão

---

#### Algoritmo 02: Cálculo da distância de multidão

---

Entrar com o conjunto ( $M$ ) de  $|M|$  soluções a serem calculadas;

**for**  $i \leftarrow 1$  **to** (QUANTIDADE DE SOLUÇÕES,  $|M|$ ) **do** inicializar distância de cada solução

┌  $dist_i = 0$

**for**  $j \leftarrow 1$  **to** (NÚMERO DE OBJETIVOS) **do**

┌ Classificar em ordem crescente o conjunto  $M$  usando o valor de cada objetivo  $f_j$ ;

┌ Atribuir os valores infinitos para as distâncias dos pontos extremos  $dist_1 = dist_{|M|} = \infty$ ;

┌ **for**  $i \leftarrow 2$  **to** ( $|M| - 1$ ) **do** cálculo da distância dos demais pontos

┌  $dist_i = dist_i + \frac{f_m^{(M_{i+1})} - f_m^{(M_{i-1})}}{f_m^{max} - f_m^{min}}$

Sair com os valores das distâncias de multidão de todas as soluções em  $M$ :

$Dist = dist_1, dist_2, \dots, dist_{|M|}$ .

---

#### 4.4.5. Convergência

O critério de convergência adotado na atual programação foi a quantidade de geração como critério de parada. Dessa forma, quando o algoritmo alcança a quantidade de gerações configurada, o mesmo finaliza a sua execução e exibe o resultado encontrado.

#### 4.4.6. Pseudocódigo Algoritmo do NSGA-II

A Figura 4-5 apresenta o Algoritmo 03 a qual mostra a sequência de passos seguidos pelo NSGA-II proposto e programados nesta dissertação.

Figura 4-5: Algoritmo do NSGA-II proposto

---

**Algoritmo 03: NSGA II proposto**

---

Entrar com os parâmetros relevantes ao NSGA II;

Inicialização:

Criar uma população de soluções aleatórias  $P_1$  de  $N$  indivíduos;

Aplicar o Algoritmo 01 em  $P_1$  calculando todas as fronteiras não-dominadas:

$F = (F_1, F_2, \dots, F_{fronts})$ ;

Aplicar o Algoritmo 02 em  $P_1$  calculando todas as distâncias de multidão:

$Dist = (dist_1, dist_2, \dots, dist_N)$ ;

Aplicar operadores genéticos em  $P_1$  para gerar uma nova população  $Q_1$  de  $N$  indivíduos;

**for**  $g \leftarrow 1$  **to** (QUANTIDADE DE GERAÇÕES-1) **do**

Aplicar o Algoritmo 01 em  $R_g = P_g \cup Q_g$  recalculando  $F = (F_1, F_2, \dots, F_{fronts})$ ;

Inicializar a próxima geração:  $P_{g+1} = \emptyset$  e  $k = 1$ ;

**until** A próxima população não for preenchida ( $|P_{g+1} \cup F_k| \leq N$ ) **do**

    Preencher a próxima população ( $P_{g+1} = P_{g+1} \cup F_k$ )

    Aumentar o contador  $k = k + 1$  checando a próxima fronteira para inclusão

Aplicar o Algoritmo 02 em  $F_k$ :  $Dist = (dist_1, dist_2, \dots, dist_{|F_k|})$

Classificar  $F_k$  em ordem decrescente pela distância de multidão

Copiar as primeiras  $N - |P_{g+1}|$  soluções de  $F_k$  para  $P_{g+1}$

Aplicar operadores genéticos em  $P_{g+1}$  para gerar uma nova população  $Q_{g+1}$  de  $N$  indivíduos;

Sair com:  $P_{final} = P_{g+1}$

---

#### **4.5. Conclusões**

Este capítulo teve como objetivo formular o Problema de alocação de banco de capacitores em rede de distribuição de energia elétrica sob a ótica multiobjetivo.

Formulou-se as funções objetivos a serem otimizadas neste trabalho e justificando a necessidade das mesmas. Para a completa formulação do PABC foram introduzidas as restrições de igualdade e desigualdade adotadas nesta dissertação e todas baseadas na legislação que o setor elétrico tem que obedecer.

Ainda neste capítulo foram apresentados os fluxos de cargas utilizados para o cálculo das funções objetivos, tanto na frequência fundamental quanto nas harmônicas que são monitoradas neste estudo.

Por fim, definimos as peculiaridades do NSGA-II proposto para otimizar os três cenários do PABC.

Com o PABC formulado e a programação das rotinas necessárias para otimiza-lo usando o NSGA-II, desenvolveu-se três metodologias com o intuito de investigar se há correlação entre os níveis de distorção harmônica de tensão e os limites do RI. Isso se faz necessário para se obter soluções que não somente minimizem as duas funções objetivos propostas, mas que venham a atender a todos as restrições de operação normatizados pelos órgãos de controle e, além disso, garantir que os BC trabalhem dentro dos seus limites de operação, aumentando desta forma a sua vida útil.

## CAPÍTULO 5. METODOLOGIA E RESULTADOS

### 5.1. Introdução

Neste capítulo são tratadas duas análises importantes considerando a mudança nas características das cargas, devido à introdução de cargas não lineares, no estudo do PABC: limitação da injeção de distorções harmônicas de tensão a certos níveis, e a utilização dos índices de ressonância em todas as barras da rede primária de distribuição teste após a instalação da solução de bancos de capacitores proposta pela metodologia deste trabalho. Portanto este estudo dará ênfase ao problema de ressonância causado pela inserção de banco de capacitores na presença de harmônicos, tendo em vista a alocação ótima de bancos de capacitores, para mitigar este efeito indesejado.

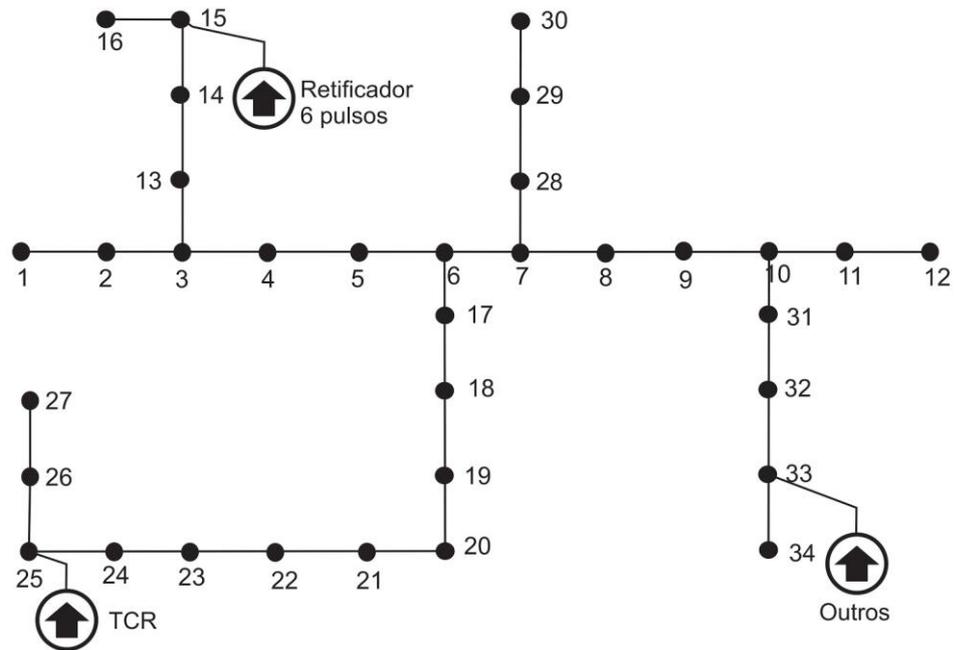
### 5.2. Sistema de Teste

O sistema escolhido para obtenção dos resultados foi a rede de distribuição radial monofásica representativa de 34 barras cujos parâmetros das linhas bem como os dados de cargas nas barras podem ser encontrados em CHIS *et al* (1997). O sistema pode ser visualizado na Figura 5-1. Esse sistema possui 4 derivações, sendo que a maior de todas parte da barra 6 do alimentador principal. O resultado do fluxo de carga para o sistema original apresenta tensões abaixo da tolerância de 0.05 p.u., convencionado como desvio máximo permitido. A necessidade de melhorias no perfil de tensão torna a rede adequada para o estudo em questão.

As três cargas não-lineares utilizadas e representadas na Figura 5-1 são bastante frequentes nas redes de distribuição reais. Seus modelos de fontes de correntes ideais também são bastante consolidados na literatura. A carga não-linear designada pela nomenclatura “outros” se refere às fontes de harmônicos genéricas, tais como reatores eletrônicos de lâmpadas, adaptadores AC/DC de aparelhos eletrônicos, dentre outros. A Tabela 4-2 mostrou o perfil dessas cargas, descrevendo-as em módulo e fase de suas componentes harmônicas.

Por simplicidade assume-se que as cargas são mantidas constantes durante o horizonte de estudo.

Figura 5-1: Representação do sistema utilizado nas simulações



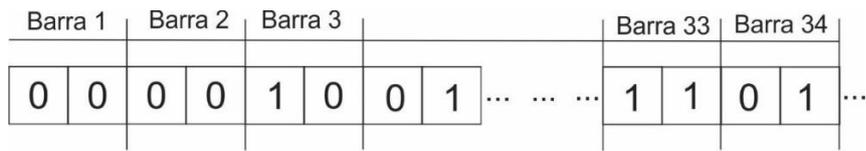
### 5.3. Parâmetros comuns

Para o Programa computacional desenvolvido, adotou-se os seguintes parâmetros de ajustes:  $N = 100$  indivíduos e 250 gerações, totalizando 25 mil soluções factíveis manipuladas em um total de  $7,4 \times 10^{19}$  soluções possíveis para o espaço de busca sendo todas candidatas a solução para o problema.

Para este estudo foram utilizados dois objetivos, definidos nas equações (4-9) e (4-10). A potência base foi definida em 100 kVA, e os dados do sistema elétrico teste são mostrados nas tabelas do Apêndice A.

Outras considerações necessárias para o total entendimento da metodologia proposta dizem respeito aos parâmetros do AG. O primeiro passo foi a concepção do cromossomo. Como explanado no item 4.4.1.1, foi adotada a representação binária e para cada uma das barras do sistema foram necessários apenas 2 *bits* para representar os possíveis bancos de capacitores a serem instalados, discriminados pelos seus valores nominais. Observa-se que a configuração “00” significa que não há banco de capacitor instalado na respectiva barra. Logo o cromossomo terá 68 alelos para representar o sistema teste de 34 barras. A Figura 5.2 mostra a estrutura do cromossomo utilizado.

Figura 5-2: Representação binária do cromossomo



É importante salientar que, por não conhecer a região factível para o problema, muitas dessas possibilidades serão rechaçadas durante o processo de otimização por não se adequarem às restrições previamente estabelecidas.

Quanto aos parâmetros referentes aos operadores genéticos, o método de seleção escolhido foi a seleção por torneio binário com taxa de sucesso do mais apto em 100%; a taxa de mutação foi de 1,47%, o que corresponde a equação (4-19); já a taxa de cruzamento foi convencionada como sendo de 90% com um ponto de corte.

Para alocação de memória utilizou-se matrizes multidimensionais de diferentes ordens para registrar as variáveis ao longo de todas as 250 iterações dos programas. Foram registradas as informações em matrizes multidimensionais mostradas na Tabela 5-1.

Tabela 5-1: Informações registradas nos programas

Variável	Descrição	Dimensão	Dimensão
$P_{binário}$	Cromossomos de P	Indivíduos X Alelos X Gerações	100x68x250
$Q_{binário}$	Cromossomos da população Q	Indivíduos X Alelos X Gerações	100x68x250
$Capacitores_p$	Soluções de P	Indivíduos X Barras X Gerações	100x34x250
$Capacitores_Q$	Soluções de Q	Indivíduos X Barras X Gerações	100x34x250
$Perdas_p$	Perdas ativas de P	Indivíduos X Gerações	100x250
$Perdas_Q$	Perdas ativas de Q	Indivíduos X Gerações	100x250
$V_p$	Perfil de tensão de P	Indivíduos X Barras X Gerações	100x34x250
$V_Q$	Perfil de tensão de Q	Indivíduos X Barras X Gerações	100x34x250
$VHar_p$	Perfil de tensão harmônica de P	Harmônicas X Barras X Indivíduos X Gerações	5x34x100x 250
$VHar_Q$	Perfil de tensão harmônica de Q	Harmônicas X Barras X Indivíduos X Gerações	5x34x100x 250
$THD_p$	Distorção Harmônica Total de P	Indivíduos X Barras X Gerações	100x34x250
$THD_Q$	Distorção Harmônica Total de Q	Indivíduos X Barras X Gerações	100x34x250

Para executar os programas foi utilizado um computador com processador Intel® Core i5, 2.6 GHz, 8 GB de RAM com 1600 MHz DDR3 e Sistema operacional macOS Sierra versão 10.12.3, rodando o ambiente de programação Matlab® R2014b.

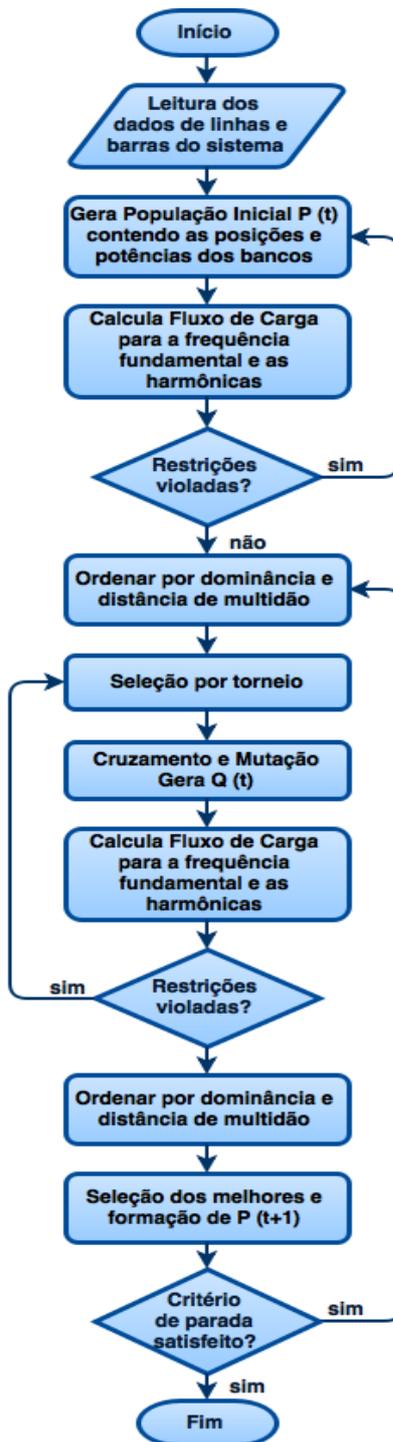
A programação foi inteiramente desenvolvida em Matlab® em todas as suas rotinas e sub-rotinas necessárias para implementar a metodologia do trabalho.

#### 5.4. Algoritmo Principal

A Figura 5-3 apresenta o fluxograma utilizado na implementação da metodologia proposta neste trabalho. Dessa forma, pode-se sintetizar tal metodologia seguindo os seguintes passos:

1. Leitura dos dados do sistema: nessa etapa, serão apresentadas as potências das cargas ligadas a cada barra, bem como as impedâncias das linhas. São definidas, também, as frequências harmônicas a serem trabalhadas;
2. O passo seguinte consiste na geração aleatória da população inicial  $P(t)$ ;
3. De posse dos indivíduos, executa-se o fluxo de carga convencional e em seguida o fluxo de carga harmônico, objetivando a obtenção das características operacionais da rede;
4. Pode-se agora avaliar os indivíduos da população inicial segundo as restrições de desigualdades do problema;
5. Caso haja violação no passo 4, os indivíduos cujas características impõem a violação de algum critério são descartados, armazenados e gerados novos indivíduos aleatórios. Quando não houver mais violações, segue-se para a ordenação da população inicial pelo critério de dominância e de distância de multidão;
6. Nesse ponto, aplicam-se a seleção e os operadores genéticos de cruzamento e mutação, obtendo-se, então,  $Q(t)$ . Vale ressaltar que a seleção dos indivíduos é feita por torneio, o cruzamento por um ponto de corte e mutação *bit a bit*;
7. Aplica-se novamente o fluxo de carga convencional, bem como o fluxo de carga harmônico, agora para os indivíduos de  $Q(t)$ ;
8. Verifica-se se algum critério foi violado: caso seja violado algum critério, retoma-se a partir do passo 7; caso contrário, ordena-se  $P(t) + Q(t)$  por dominância e distância de multidão, selecionando, em seguida, os melhores para compor  $P(t+1)$ ;

Figura 5-3: Fluxograma da implementação computacional do problema



Uma vez descrito o problema, estabelecidos os parâmetros e a modelagem do sistema, bem como o algoritmo a ser utilizado, tem-se o alicerce para a resolução do PABC. Este trabalho buscará, a partir deste ponto, avaliar o desempenho do NSGA-II para o cumprimento desta tarefa, investigando ainda quais critérios referentes ao fenômeno de harmônicos podem ser utilizados para melhorar o desempenho do sistema e evitar danos provenientes da ressonância.

## 5.5. Cenário 1: Inclusão das restrições de THD ao PABC

Como relatado na seção 4.2 e seu subitem, além das duas funções objetivo, o PABC também é composto pelas restrições de igualdades e desigualdades, as quais servem para adequar o problema às requisições legais ou às conveniências requeridas pelos projetistas. O item 4.4.1 tratou sobre a restrição de igualdade imposta neste trabalho devido à atuação do operador genético da mutação no gene referente a barra 01, isto é, não permitindo a instalação de BC na barra 01. Além disso, buscou-se atender à normatização existente, sobretudo ao Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) e à IEEE 519 - 2014, os quais dispõem, dentre outros, níveis aceitáveis de tensão e distorção harmônica em cada barra, respectivamente. Portanto, para atender a tais normas deve-se inserir ao PABC as restrições de Distorções Harmônicas de tensão ( $THD_v$ ) e as Distorções Harmônicas Individual de tensão ( $IHD_v$ ) como parâmetros de ressonância harmônica em todas as barras para que as soluções processadas ao longo da metodologia proposta sejam consideradas como factíveis.

### 5.5.1. Metodologia proposta para avaliação de Distorções Harmônicas ao PABC

A metodologia proposta para o cenário 1, compreende justamente a inserção da avaliação dos níveis da Distorção Harmônica Total de tensão ( $THD_v$ ) e a Distorção Harmônica Individual de tensão ( $IHD_v$ ) como parâmetros de ressonância harmônica em todas as barras e confrontando com os estabelecidos pela Norma IEEE 519 - 2014. Assim, o limite de  $THD_v$  recomendável é de 5%, enquanto que o limite de  $IHD_v$  é de 3% para redes de até 69 kV. Esses limites serão inseridos na metodologia proposta para a resolução do PABC como duas restrições de desigualdades. Nesse sentido, em conjunto com as duas funções objetivos que o compõem, o PABC fica descrito através das equações em (5-1), que nada mais são do que as equações (4-9) e (4-10) com a inserção das restrições de tensão,  $THD_v$  e  $IHD_v$ .

$$\left. \begin{aligned}
\min F_1 &= k_a \sum_{m=1}^{N_b} (C_b) + k_b \sum_{n=1}^{N_b-1} (P_f + P_h) \\
\min F_2 &= \text{máx} \|V_{REF} - \vec{V}_j\| \\
\text{s. a} \\
\|V_{REF} - \vec{V}_j\| &\leq 0.5 \text{ p.u.} \\
THD_v &\leq 5\% \\
IHD_v &\leq 3\%
\end{aligned} \right\} \quad (5-1)$$

Em que,

- $F_1, F_2$  → Objetivos;
- $k_a, k_b$  → Constantes que indicam o custo unitário dos bancos e do kWh em um determinado tempo, respectivamente;
- $C_b$  → Potências dos bancos de capacitores individualmente;
- $P_f$  → Perdas ativas na frequência fundamental;
- $P_h$  → Perdas ativas nas frequências harmônicas;
- $N_b$  → Número máximo de barras;
- $V_{REF}$  → Tensão de referência em p.u.;
- $V_j$  → Tensão em cada barra em p.u.;
- $THD_v$  → Distorção Harmônica Total de tensão.
- $IHD_v$  → Distorção Harmônica Individual de tensão.

### 5.5.2. Estatísticas da simulação do Cenário 01

O programa foi desenvolvido inteiramente em MATLAB® pelo autor desta dissertação de mestrado tanto quanto a rotina principal e as suas sub-rotinas (operadores genéticos, ordenar por dominância, distância de multidão, fluxo de carga na fundamental e nas harmônicas). A Tabela 5-2 mostra algumas estatísticas da simulação realizada:

Tabela 5-2: Estatísticas da simulação do Cenário 01

Dados da Simulação	
Tempo de simulação	12min51.39sec
Geração	250
Tamanho da População	100
Inicialização da População Inicial	Aleatória
Taxa de mutação	1,47%
Taxa de Cruzamento	90%
Variáveis (número de barras)	34
Violações da restrição de igualdade	887
Soluções Processadas	27.251
Violações somente do limite de tensão	997
Violação dos limites de THD e IHD	291
Violação dos limites tensão, THD e IHD	963
Fluxos de carga executados	313.506

A complexidade computacional desta programação é onerada pelos 313.506 fluxos de carga executados para um sistema de pequeno porte, ou seja, quanto maior a rede de distribuição maior será o tempo de execução do programa. Entretanto, vale ressaltar a importância desta ferramenta para o planejamento do sistema de distribuição de energia elétrica, uma vez que o espaço dos objetivos tem  $7,4 \times 10^{19}$  soluções possíveis e testá-las, uma a uma, torna-se uma tarefa irrealizável mesmo utilizando o conhecimento prático por parte do projetista.

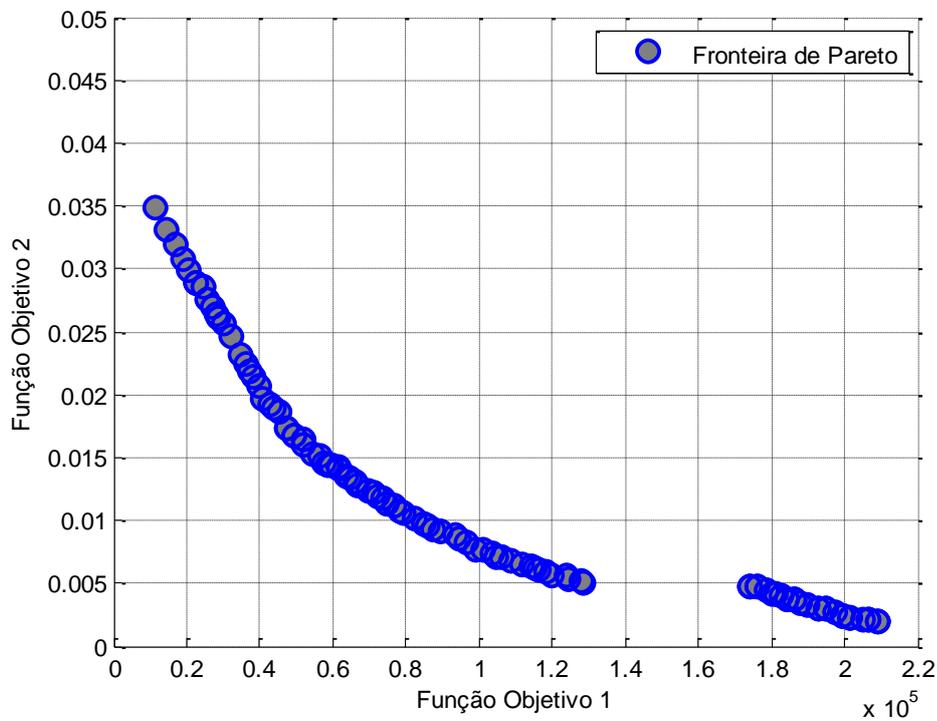
### 5.5.3. Resultado da simulação do cenário 01

A Figura 5-4 mostra os resultados da simulação para o Cenário 01. Vale ressaltar que em todas as simulações deste trabalho considerou-se que o sistema não continha BC's previamente instalados no sistema. Como resposta o programa imprime a fronteira de Pareto obtida pelo NSGA-II. Observa-se que o programa conseguiu classificar 100 soluções (tamanho da população) como não dominadas. Estas soluções são a resposta do programa, ou seja, o usuário do programa tem uma gama de cem soluções para aplicar em sua RDU. Convém enfatizar que todas estas soluções ótimas obedecem às restrições impostas ao problema e envolvem situações de *trade-off*, nas quais o conflito de escolha está em que soluções mais caras (requerem maior

investimento por parte da concessionária de energia elétrica) melhoram o perfil de tensão de todas as barras e consequentemente as perdas do sistema e vice-versa.

Pode-se observar na Figura 5-4 que a fronteira de Pareto obtida como resposta condiz com a curva que é esperada quando se busca a minimização das duas funções objetivos (Figura 3-6). A resposta é formada por duas regiões descontínuas que formam um *gap* na fronteira. Outrossim, é o espalhamento das soluções nas duas regiões que pode ser utilizado como critério de convergência de metaheurísticas MO, como é o caso do NSGA-II.

Figura 5-4: Fronteira de Pareto para o Cenário 01

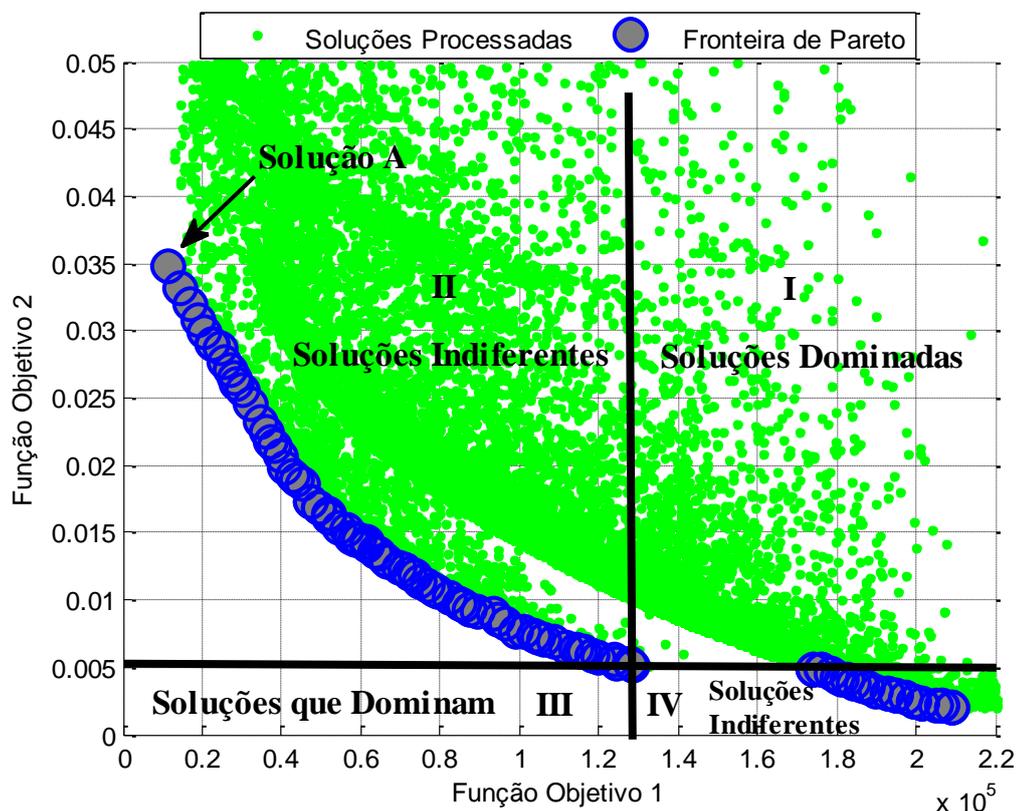


#### 5.5.4. Análise da formação do *gap* do Cenário 01

Outro comportamento que merece ser analisado mais a fundo é o *gap* formado na Fronteira de Pareto, indicado na Figura 5-4. Na Figura 5-5 é exibida todas as soluções factíveis que foram processadas nesta simulação do Cenário 01. Vale ressaltar que o espaço de objetivos factíveis para esse e os demais cenários propostos nesta dissertação estão abaixo da reta  $f_2 = 0,05$  devido à restrição de desigualdade de tensão. Para justificar o *gap* formado no resultado da simulação, foi usado o conceito do quadrante de dominância, ficando de forma mais clara a formação das

duas regiões no Pareto, uma vez que a região do primeiro quadrante é a região das soluções dominadas pela solução em análise

Figura 5-5: *Gap* formado na Fronteira de Pareto



### 5.5.5. Análise de uma solução da Fronteira do Cenário 01

Como mencionado, a escolha da solução a ser executada envolve uma relação de *trade-off*. Supõem-se que a concessionária dispõe de poucos recursos para implementação de um projeto de compensação capacitiva, logo a solução que mais chama atenção na fronteira é a Solução A, impressa na Figura 5-5.

Passaremos à análise da solução A na fronteira de Pareto através dos seus dados técnicos mostrados na Tabela 5-3, a qual detalha por barra do sistema qual banco foi sugerido a ser instalado, o perfil de tensão de cada barra após a implementação da solução completa e o  $THD_v$ .

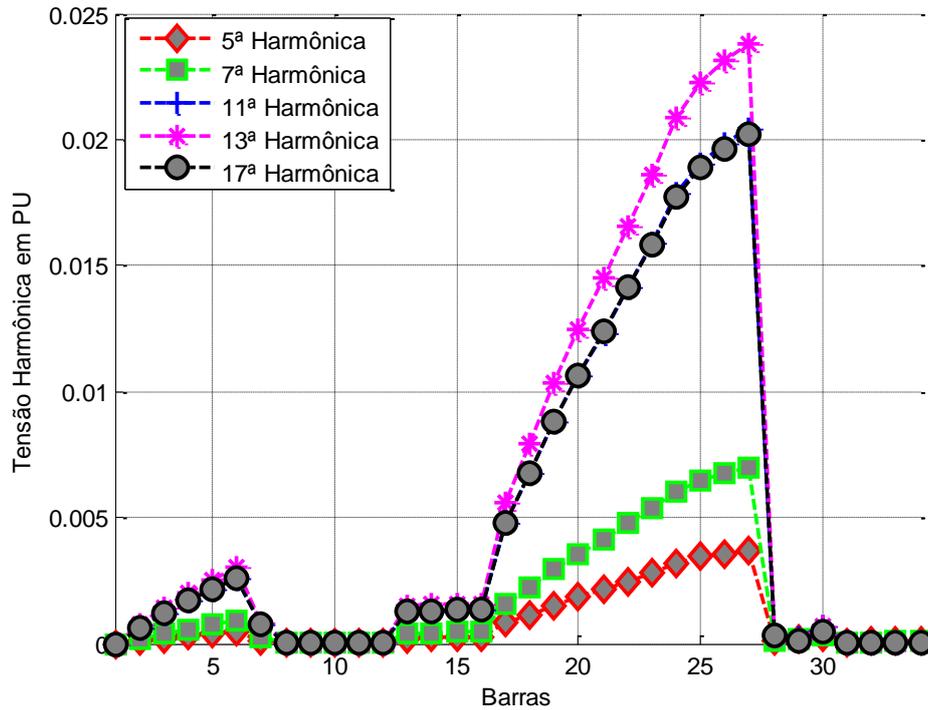
Tabela 5-3: Resultados para a Solução A.

Barras	Banco (kvar)	V (pu)	THD (%)	Barras	Banco (kvar)	V (pu)	THD (%)
1	0	1	0	18	0	0,97917	1,31665
2	0	0,99591	0,11791	19	0	0,97943	1,7221
3	0	0,99243	0,22649	20	0	0,98008	2,08041
4	0	0,98701	0,3263	21	0	0,98113	2,42633
5	0	0,98243	0,41482	22	0	0,98174	2,79005
6	0	0,97819	0,50412	23	0	0,98292	3,13607
7	0	0,97142	0,14204	24	0	0,98502	3,52735
8	0	0,96862	0,01398	25	0	0,98688	3,77164
9	0	0,96671	0,01144	26	0	0,98832	3,91809
10	0	0,9659	0,01104	27	0	0,98972	<b>4,03451</b>
11	600	0,96556	0,01124	28	0	0,97014	0,06074
12	0	0,96542	0,01125	29	300	0,96897	0,04297
13	0	0,99209	0,23607	30	0	0,96784	0,12098
14	0	0,99179	0,24911	31	600	0,9657	0,01156
15	0	0,99171	0,25384	32	0	0,96536	0,01354
16	0	0,99171	0,25563	33	0	0,96519	0,01568
17	0	0,9785	0,9263	34	0	0,96514	0,01569
Objetivo 1				0,034862553			
Objetivo 2				\$11.204,33			

Analisando os dados da solução citada, observa-se que o programa sugeriu a instalação de três BC nas barras 11, 29 e 31, de potências 600, 300 e 600 kVAr respectivamente, não contendo, inclusive, nenhum banco de 1200 kVAr, o mais caro dos bancos considerados neste trabalho. Percebe-se, ainda, que o  $THD_v$  máximo não foi superior a 5%, mostrando que não houve amplificação dos harmônicos que viesse a comprometer algum dos limites adotados. Nota-se ainda que o  $THD_v$  registrou os maiores valores entre as barras 17 a 27 e que esses registros foram elevando-se gradualmente até o valor máximo de 4,03%. O perfil harmônico de tensão pode ser melhor analisado na Figura 5-6, em que se nota o evidente sobressalto da 13ª harmônica frente às demais, além de que o  $IHD_v$  máximo não excedeu o limite de 3% e mostra mais claramente o aumento gradual entre as barras 17 a 27 de cada uma das 5 componentes harmônicas monitoradas neste trabalho.

Vale ressaltar que a Solução A é apenas uma das várias soluções de Pareto que podem ser tomadas pelo projetista como resposta ao dimensionamento e alocação de BC's.

Figura 5-6: Conteúdo harmônico detalhado da Solução A do Cenário 01 em cada barra.

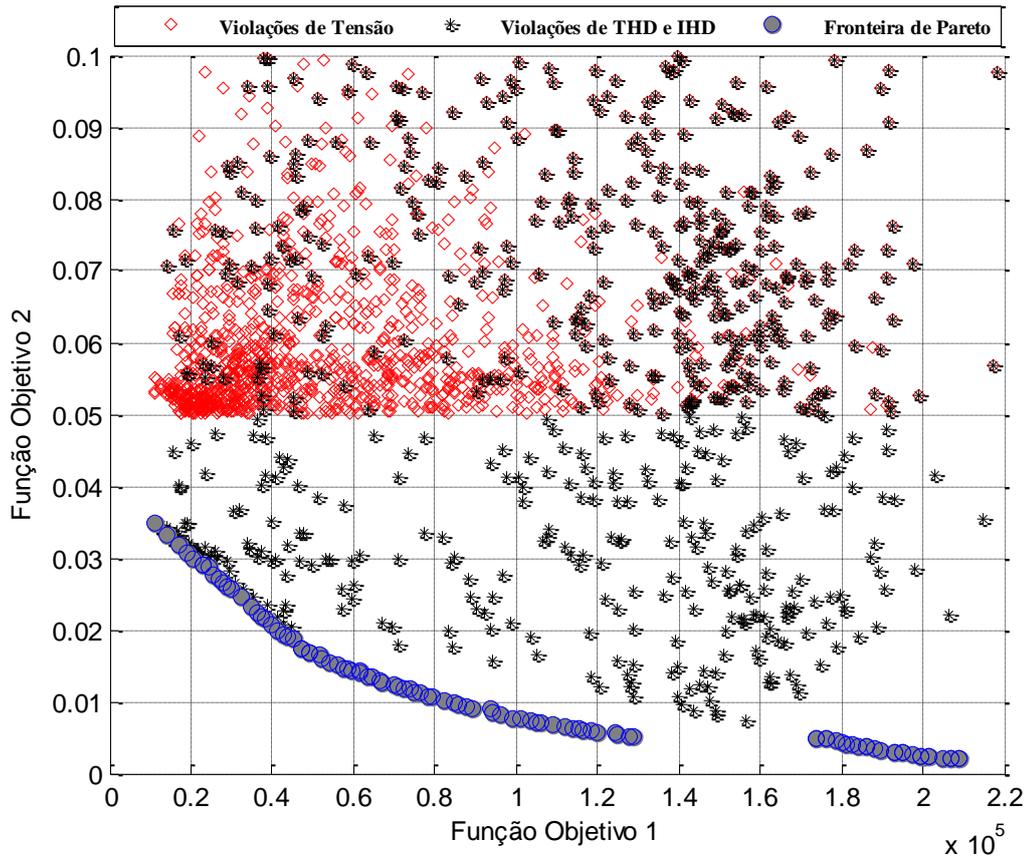


### 5.5.6. Análise do espaço dos objetivos para o Cenário 01

A Figura 5-7 mostra os resultados para a metodologia proposta no primeiro cenário, com as soluções que infringiram algum dos critérios de desigualdade estipulados em (5-1). Além de receber uma legenda específica, foram registradas para que pudessem ser estudadas em separado ao final da simulação. Como pode ser observado, todos os pontos em preto representam soluções que violaram os limites de  $THD_v$  e  $IHD_v$ . Por outro lado, soluções que violaram os limites de tensão pré-estabelecidos foram marcadas em vermelho e impressas em conjunto com a fronteira de Pareto.

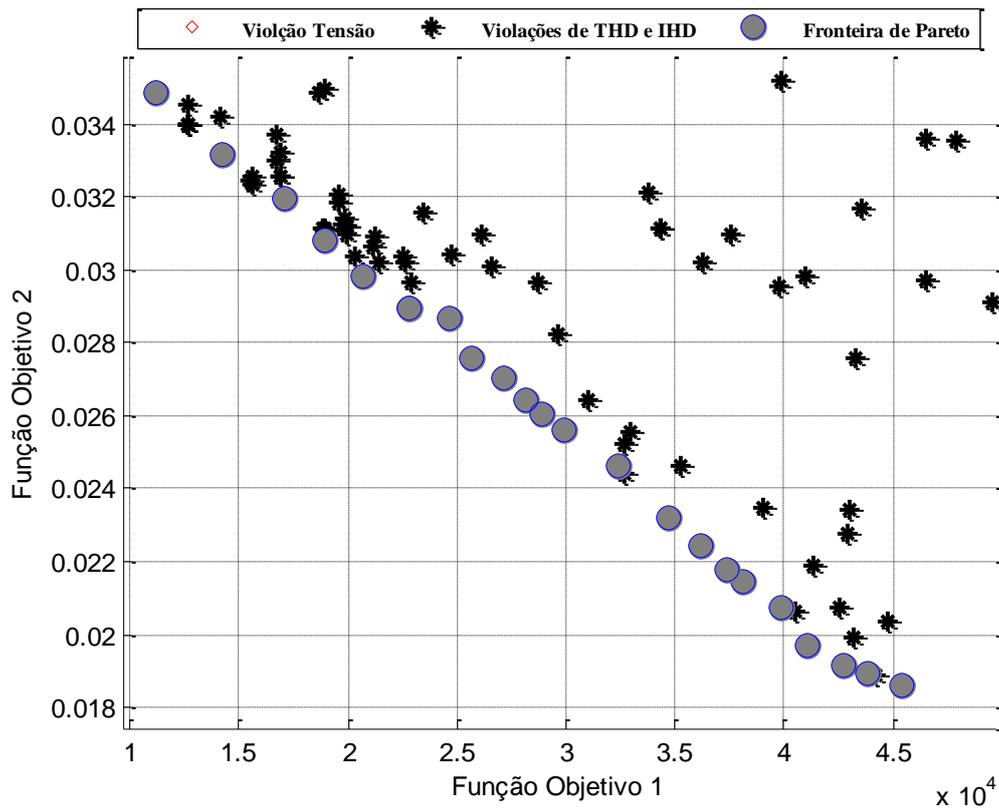
Analisando a Figura 5-7, pode-se observar que existem alguns pontos, marcados por asteriscos, que violaram os limites de  $THD_v$  ou  $IHD_v$ , mas que não foram dominados por nenhum dos pontos da melhor fronteira obtida pelo programa. Caso a distorção harmônica fosse negligenciada, tais soluções poderiam ter sido consideradas como viáveis e participar do conjunto de soluções do problema, apesar das características não desejáveis que trariam ao sistema. Dessa forma, fica evidente a grande relevância da análise de  $THD_v$  e  $IHD_v$  para que o programa em questão obtenha resultados consistentes.

Figura 5-7: Front de Pareto e violações para o Cenário 1



É possível perceber claramente que as violações de tensão ficaram todas acima do limite estabelecido de 5% do valor nominal. Isso se deu devido à restrição referente à violação de tensão ter sido constituída de uma inequação modular simples, em que são aceitáveis quaisquer valores dentro da faixa de tensão que vai de 0.95 a 1.05 p.u. As violações de  $THD_v$  e  $IHD_v$ , por sua vez, ocorreram em diferentes regiões. Esse comportamento se deve às restrições de distorção harmônica não necessariamente implicarem no aumento dos níveis de tensão. Há, no entanto, diversos casos em que as soluções violaram ambas as restrições, em que se presume o aumento de tensão ocasionado pelo aumento na amplitude de certas frequências harmônicas.

Figura 5-8: Análise em detalhe da fronteira de Pareto do Cenário 1.



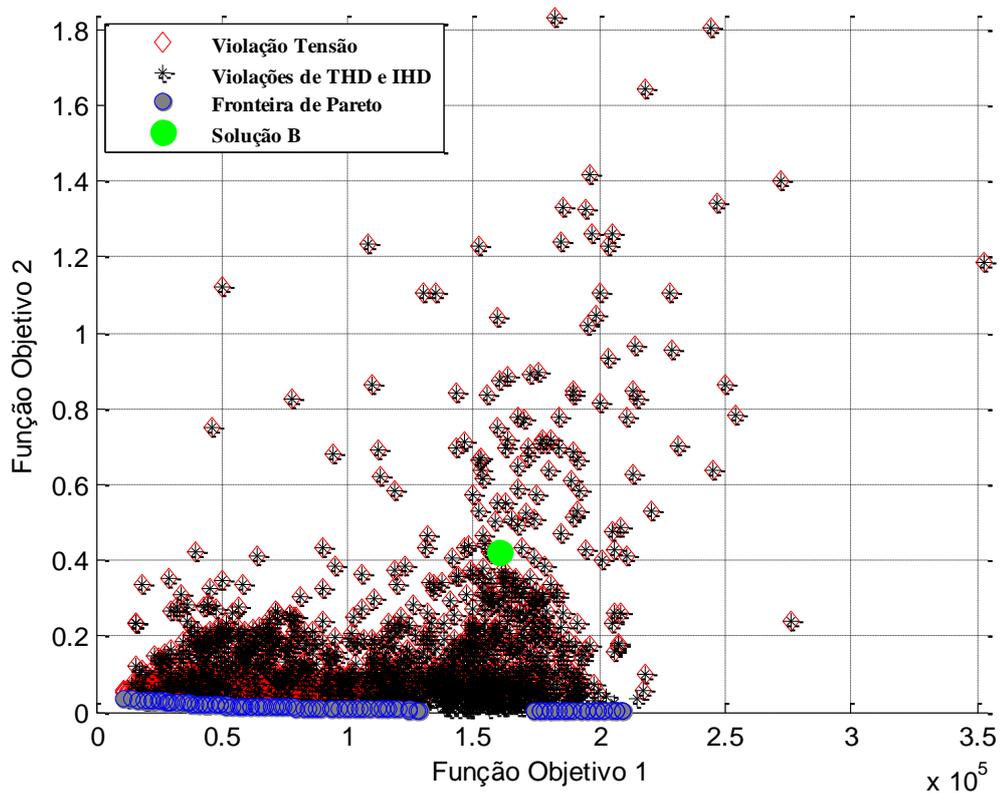
### 5.5.7. Ocorrência de ressonância e amplificação de tensão harmônica: Cenário 01

O THD, segundo a Norma IEEE 519, indica o nível de distorção harmônica de tensão ( $THD_v$ ) ou de corrente ( $THD_i$ ) em um determinado ponto da rede. Conforme visto, tal índice é constituído pela contribuição de todos os harmônicos presentes na rede de distribuição considerada. Baseado nesta afirmação, torna-se claro que havendo distorções totais cuja composição viole o limite estabelecido, não necessariamente serão caracterizados estágios de amplificação ou ressonância harmônica. De igual modo, caso apenas o limite de distorção harmônica individual seja violado, não há suficiência para se afirmar a ocorrência de ressonância harmônica. Outrossim, a inserção e o monitoramento dos níveis de distorção harmônica são de grande importância no PABC, devido ao fato de que se o mesmo não fosse monitorado (PABC tradicional) poderiam ocorrer estágios de amplificação ou ressonância harmônica como mostra a Figura 5-7, pois acima da reta  $f_2 = 0.05$  existem soluções em que as violações de tensão ocorrem em conjunto com as violações das restrições harmônicas (pontos em vermelho e preto coincidentes). Esse fenômeno poderá inviabilizar qualquer projeto de

compensação reativa por parte da concessionária de energia elétrica que negligenciar tais efeitos em sua RDU, ou seja, a vida útil dos bancos de capacitores diminuirá.

Para demonstrar a ocorrência de amplificação ou ressonância harmônica no PABC analisa-se a Figura 5-9 que mostra todas as soluções processadas pelo algoritmo. Nela pode-se observar que na simulação do cenário 01, a partir de um certo desvio de tensão, as soluções que violam  $F_2$  acompanham obrigatoriamente as violações de  $THD_v$  e  $IHD_v$ . Essas soluções chegam a patamares de 2p.u. o que evidencia a ocorrência do fenômeno de ressonância e/ou amplificação de tensão no sistema teste desta metodologia.

Figura 5-9: Violações processadas na simulação do cenário 01



Analisa-se a Solução B destacada em verde na Figura 5-9. Essa solução seria uma candidata a preencher o *gap* formado na fronteira de Pareto, entretanto violou os dois critérios do Cenário 1. Enfatiza-se o fato de que a Solução B não é tão severa ao se comparar com outras de desvio de tensão maiores. A Tabela 5-4 detalha o resultado desta solução.

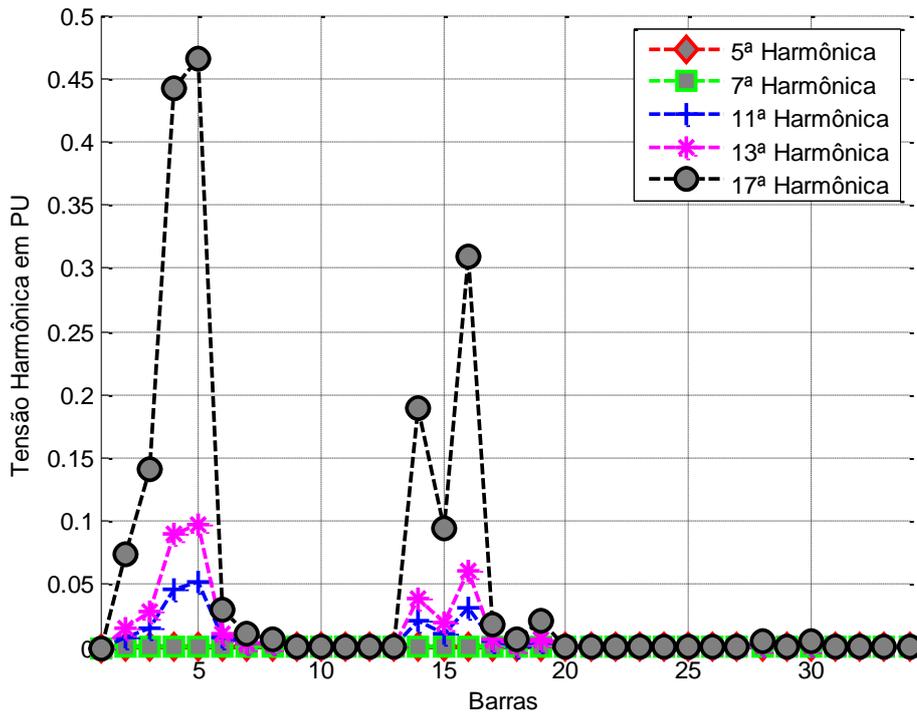
Tabela 5-4: Resultados para a Solução B

Barras	Banco (kvar)	V (pu)	THD (%)	Barras	Banco (kvar)	V (pu)	THD (%)
1	0	1	0	18	1200	0,989	0,767
2	0	0,97	7,59	19	1200	1,028	2,25
3	0	0,947	14,5	20	1200	0,998	0,038
4	<b>1200</b>	<b>1,377</b>	<b>45,375</b>	21	1200	0,994	0,119
5	<b>1200</b>	<b>1,423</b>	<b>47,916</b>	22	1200	0,996	0,05
6	1200	0,957	3,334	23	300	0,994	0,041
7	1200	1,016	1,283	24	1200	0,993	0,006
8	300	0,984	0,924	25	1200	0,993	0,005
9	600	0,998	0,116	26	1200	0,992	0,003
10	0	0,997	0,071	27	0	0,992	0,01
11	300	0,997	0,072	28	0	1,007	0,642
12	1200	0,997	0,073	29	1200	0,998	0,002
13	300	1	0,105	30	0	0,989	0,641
14	<b>300</b>	<b>1,117</b>	<b>19,389</b>	31	600	0,997	0,051
15	600	0,962	9,693	32	0	0,997	0,024
16	<b>0</b>	<b>0,921</b>	<b>31,678</b>	33	300	0,996	0,006
17	1200	0,973	1,987	34	600	0,996	0,002
Objetivo 1				0,423479			
Objetivo 2				\$160.655,75			

Da Tabela 5-4, observa-se que os dois BC's instalados nas barras 4 e 5 sofreram com o efeito dos fenômenos da amplificação de tensão pois apresentaram níveis de  $THD_v = 47,916\%$  na barra 5, que é o mais severo caso entre todas as barras para a solução B. Na Figura 5-10 tem-se o conteúdo harmônico detalhado para cada barra do sistema.

Ressalta-se o fato de que o programa acabou processando e descartando soluções mais severas que a própria solução B. Os níveis de tensão na barra chegaram a ultrapassar 3 p.u., mas por questão de resolução da figura não foram plotadas no gráfico. Desta forma, fica evidenciada a relevância da utilização desta metodologia na otimização do PABC.

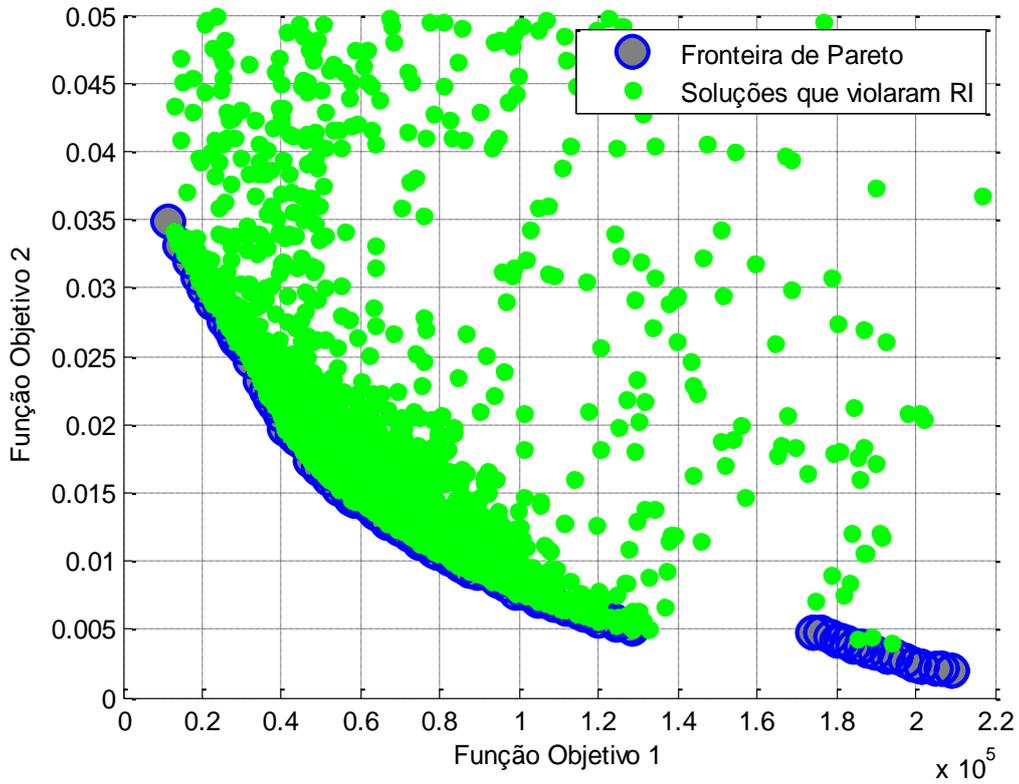
Figura 5-10: Conteúdo harmônico detalhado da Solução B do Cenário 01 em cada barra.



### 5.5.8. Análise do Cenário 01 x Índice de ressonância

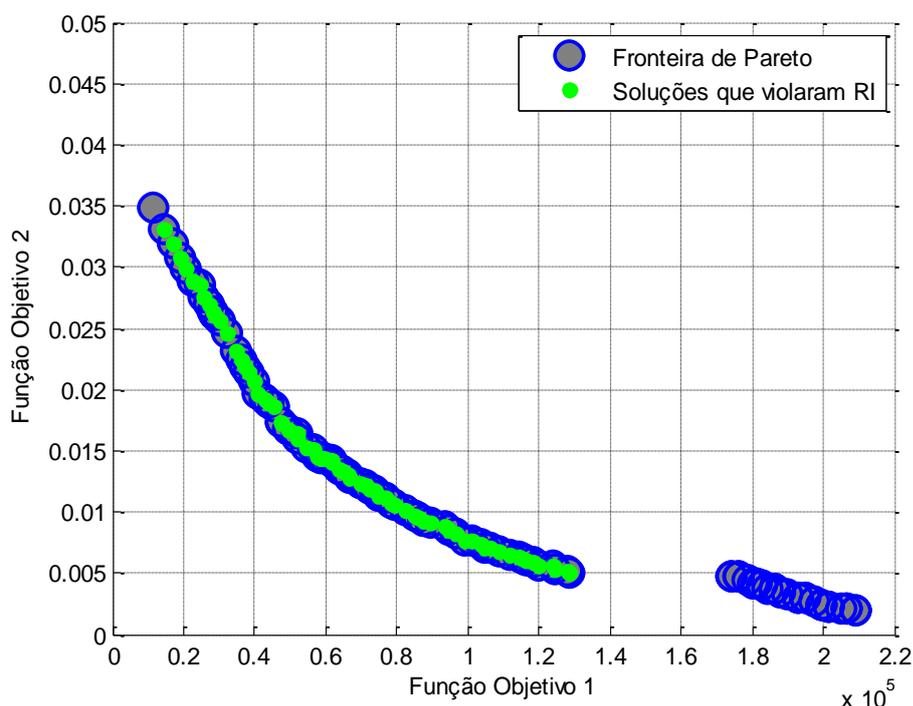
Os níveis de distorção harmônica não são suficientes para afirmar que o projeto de compensação reativa escolhido pela metodologia do Cenário 01 irá garantir que os bancos tenham uma vida útil de 20 anos. Para comprovar esta afirmação vamos considerar o mesmo cenário, e utilizando os dados armazenados da simulação em epígrafe, computou-se as ocorrências de violação do RI, as quais não foram rechaçadas no decurso deste processo de otimização. Sob essa perspectiva é possível observar na Figura 5-11 as soluções que violariam o RI, caso este fosse monitorado durante a simulação do Cenário 1, grafadas em verde. Nesta figura, observa-se que a primeira região da fronteira de Pareto formadas por  $F_1 < 1.4 \times 10^5$  é uma região do espaço dos objetivos no qual ocorre uma grande incidência de violações dos índices de ressonância.

Figura 5-11: Cenário 01 com as soluções processadas que violaram o RI



Tantas violações próximas umas às outras dificultaram a análise gráfica, por isso plota-se a Figura 5-12 para analisar melhor a incidência do RI na solução do Cenário 01. Fica evidente que praticamente toda a primeira região da fronteira de Pareto da simulação do Cenário 01 violaria algum dos critérios do RI. Nesse sentido, observa-se que somente o  $THD_v$  e o  $IHD_v$  são insuficientes para garantir a operação segura dos bancos de capacitores.

Figura 5-12: Solução do Cenário 01 x índice de Ressonância



### 5.5.9. Considerações Finais do Cenário 01

Nesse sentido, torna-se evidente a necessidade do estudo prévio do perfil harmônico das redes de distribuição antes de se executar a alocação de banco de capacitores, uma vez que uma solução que incorrerá em altos índices de distorção harmônica, pode ser tomada como viável caso esse critério seja inobservado. Vale ressaltar que analisar apenas esse critério não é suficiente para garantir uma operação segura dos mesmos, desta forma será analisada a metodologia para um segundo cenário que é detalhada como se segue.

## 5.6. Cenário 2: Inclusão das restrições de índice de ressonância ao PABC

### 5.6.1. Introdução

Como vimos no item anterior a utilização de  $THD_v$  e  $IHD_v$  como restrição de desigualdade no PABC não é suficiente para garantir a operação segura dos bancos de capacitores. Isso se dá pelo fato dos capacitores serem caminho de baixa impedância para frequências harmônicas

como mencionamos no item 2.5.1, por isso é necessário calcular as impedâncias harmônicas vistas das barras com capacitores e avaliar se estão em ressonância e, conseqüentemente, causando avarias nestes capacitores. Vale ressaltar que as componentes harmônicas analisadas neste trabalho são as de 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup>, 13<sup>a</sup> e 17<sup>a</sup> ordens. Desta forma estamos evitando projetos de compensação capacitiva que criem ressonâncias nestas frequências.

### 5.6.2. Metodologia proposta para avaliação de Distorções Harmônicas ao PABC

Como mencionou-se no item 2.6.2 o índice de ressonância (RI) do ponto de vista do capacitor foi definido por HUANG *et al* (2003), culminando na elaboração das inequações (2-4), (2-5), (2-6) e (2-7). Baseou-se nos limites propostos pela norma IEEE 1036-2010, a qual recomenda os limites de operação para capacitores paralelos de potência, mostrados na Tabela 5-5.

Tabela 5-5: Limites operacionais dos capacitores de potência segundo IEEE 1036 – 2010

Grandeza	Descrição	Limite (%)
$S$	Potência aparente	135
$V_{rms}$	Tensão RMS	110
$V_{pico}$	Tensão pico	120
$I_{rms}$	Corrente RMS	180

Dessa forma podemos definir a metodologia do Cenário 2 que considera, como indicação da ocorrência de ressonância harmônica o RI, logo qualquer violação das inequações será considerada como uma violação de restrição de desigualdade na metodologia proposta. Neste segundo cenário retira-se as restrições de  $THD_v$  e  $IHD_v$  para avaliar que somente o monitoramento do RI exclui a ocorrência de  $THD_v$  e  $IHD_v$ . Nesse sentido, o conjunto com as duas funções objetivos que compõem o PABC para esta metodologia fica descrito como a seguir:

$$\left. \begin{aligned}
\min F_1 &= k_a \sum_{m=1}^{N_b} (C_b) + k_b \sum_{n=1}^{N_b-1} (P_f + P_h) \\
\min F_2 &= \text{máx} \|V_{REF} - \vec{V}_j\| \\
\text{s. a} \\
\|V_{REF} - \vec{V}_j\| &\leq 0.5 \text{ p.u.} \\
\sqrt{1 + \sum_n \left(\frac{\alpha_n RI_n}{n}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + \sum_n (\alpha_n RI_n)^2} &\leq 135\% \\
\sqrt{1 + \sum_n \left(\frac{\alpha_n RI_n}{n}\right)^2} &\leq 110\% \\
1 + \sum_n \left(\frac{\alpha_n RI_n}{n}\right) &\leq 120\% \\
\sqrt{1 + \sum_n (\alpha_n RI_n)^2} &\leq 180\%
\end{aligned} \right\} \quad (5-2)$$

Em que,

- $F_1, F_2$  → Objetivos;
- $k_a, k_b$  → Constantes que indicam o custo unitário dos bancos e do kWh em um determinado tempo, respetivamente;
- $C_b$  → Potências dos bancos de capacitores individualmente;
- $P_f$  → Perdas ativas na frequência fundamental;
- $P_h$  → Perdas ativas nas frequências harmônicas;
- $N_b$  → Número máximo de barras;
- $V_{REF}$  → Tensão de referência em p.u.;
- $V_j$  → Tensão em cada barra em p.u.;
- $RI_n$  → Índice de ressonância.
- $\alpha_n$  → Distorção Harmônica Individual para o harmônico de ordem n.

### 5.6.3. Inicialização da população inicial do Cenário 02

Com base nas análises realizadas no item 5.5.8, que justifica a inserção do RI como critério de desigualdade no PABC, mais precisamente tendo em vista a Figura 5-11, na qual existem muitas soluções antes factíveis para o Cenário 1, mas que violam o RI para o segundo cenário, levantou-se a hipótese de que aquela região poderia a se tornar a Fronteira ótima para o problema. Nesse intuito, a população inicial desta metodologia não foi inicializada aleatoriamente, utilizou-se a fronteira de Pareto do Cenário 01 como ponto de partida da simulação que será discutida neste trabalho.

### 5.6.4. Estatísticas da simulação do Cenário 02

O programa foi desenvolvido inteiramente em MATLAB® pelo autor desta dissertação de mestrado tanto quanto a rotina principal e as suas sub-rotinas (operadores genéticos, ordenar por dominância, distância de multidão, fluxo de carga na frequência fundamental e nas frequências harmônicas). A Tabela 5-6 exhibe as estatísticas da simulação para o Cenário 02:

Tabela 5-6: Estatísticas da simulação do Cenário 02

Dados da Simulação	
Tempo de simulação	39min 0.03sec
Geração	250
Tamanho da População	100
Inicialização da População inicial	Pareto Cenário 01
Taxa de mutação	1,47%
Taxa de Cruzamento	90%
Variáveis (número de barras)	34
Soluções Processadas	28.691
Soluções factíveis	25.000
Violações da restrição de igualdade	882
Violações somente do limite de tensão	791
Violações do limite de Tensão e RI	1013
Violações somente do limite do RI	1887
Fluxos de carga executados	313.725
Equivalentes Thevenin processados	7.376.280

Nota-se imediatamente que o tempo de simulação é superior ao dobro do obtido no Cenário 1. Isso se deve ao fato de que o processo para obtenção do valor do RI depende do cálculo da impedância equivalente de Thevenin para cada BC a ser instalado na rede. Conforme Tabela 5-6, o programa executou 7.376.280 cálculos de equivalente Thevenin. Para a frequência fundamental e cada uma das cinco componentes harmônicas foram realizados 1.229.380 cálculos das impedâncias equivalentes. Essa quantidade de processamento elevou ainda mais o esforço computacional ao ponto de que a metodologia proposta para este cenário levou mais que o dobro do tempo de simulação da metodologia para o Cenário 01.

Enfatizamos novamente que a ferramenta MO proposta para a otimização do PABC é para o planejamento do sistema, logo o tempo de processamento não é uma preocupação tão importante quando comparamos com as ferramentas *online* que exigem uma intervenção imediata no sistema elétrico de potência.

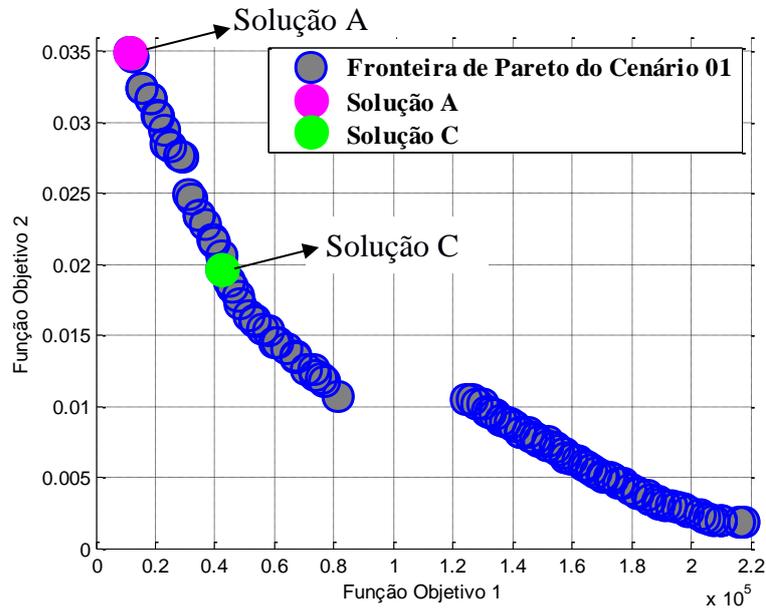
#### **5.6.5. Resultado da simulação do Cenário 02**

A Figura 5-13 mostra os resultados da simulação para o Cenário 02 que nada mais é do que a fronteira de Pareto com cem soluções classificadas na primeira fronteira. Vale ressaltar que em todas as simulações deste trabalho considerou-se que o sistema não continha BC's previamente instalados no sistema. Como resposta o programa imprime a fronteira de Pareto obtida pelo NSGA-II. De forma análoga ao cenário anterior a resposta é formada por duas regiões descontínuas que formam um *gap* na fronteira desta simulação.

#### **5.6.6. Análise da formação do *gap* do Cenário 02**

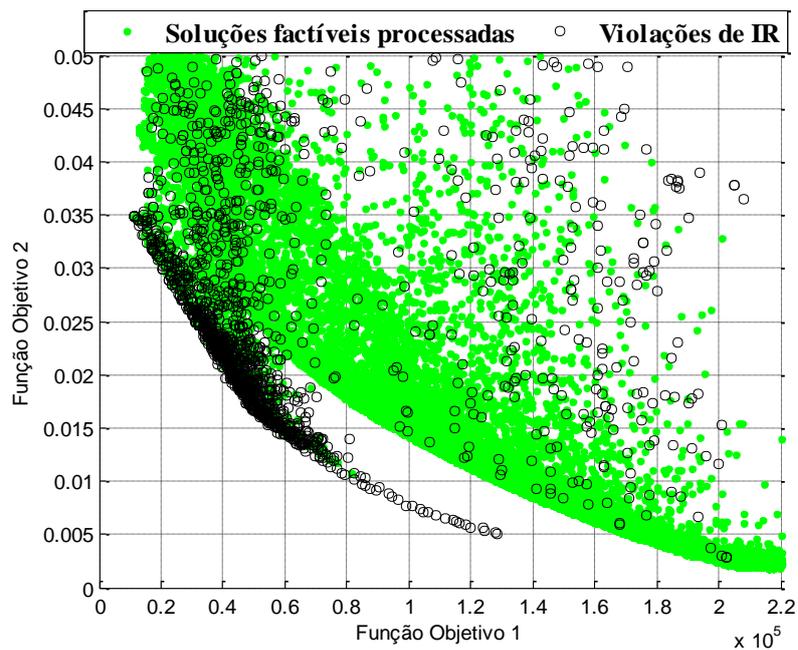
A formação do *gap* na Figura 5-13 tem a mesma explicação que fora dada no item 5.5.5. Vale ressaltar que a região de ocorrência do *gap* não é a mesma da Figura 5-5. Na simulação do Cenário 01 ele ocorre no intervalo de  $1.3 \times 10^5 \leq f_1 \leq 1.7 \times 10^5$ , mas na simulação deste Cenário ela foi deslocada para a esquerda ocorrendo na região compreendida por:  $0.8 \times 10^5 \leq f_1 \leq 1.1 \times 10^5$ .

Figura 5-13: Fronteira de Pareto para o Cenário 02



Esse deslocamento ocorreu devido a mudança no espaço dos objetivos com a inserção das quatro restrições de índice de ressonância ao PABC. Essa mudança no espaço é melhor visualizada ao imprimir em conjunto com as soluções factíveis, as soluções que violaram algum dos limites estabelecidos pela IEEE 1036 – 2010. Para isso plota-se a Figura 5-14, na qual é mostrado que o *gap* formado pelo Cenário 02 foi formado por soluções que violaram o RI.

Figura 5-14: Violação do RI em conjunto com as soluções factíveis



### 5.6.7. Análise de uma solução da Fronteira do Cenário 02

Passa-se à análise da Solução C impressa na Figura 5-13 na fronteira de Pareto. Os seus dados de simulação são mostrados na Tabela 5-7, a qual detalha por barra os dados da simulação do Cenário 02.

Analisando os dados da solução citada, observa-se que o programa sugeriu a instalação de dez BC' na rede teste. Os perfis de tensão permaneceram dentro do que estabelece a ANEEL através da Resolução 505/2001. Assim como os níveis de operação da análise de RI advindos da norma IEE 1036. Apesar de não ser critério de desigualdade da metodologia do Cenário 02 os percentuais de  $THD_v$  das barras 20 a 27 apresentaram percentuais que violam os limites propostos pela IEEE 519, ou seja, a metodologia proposta para o Cenário 02 não foi suficiente para garantir o atendimento da referida norma.

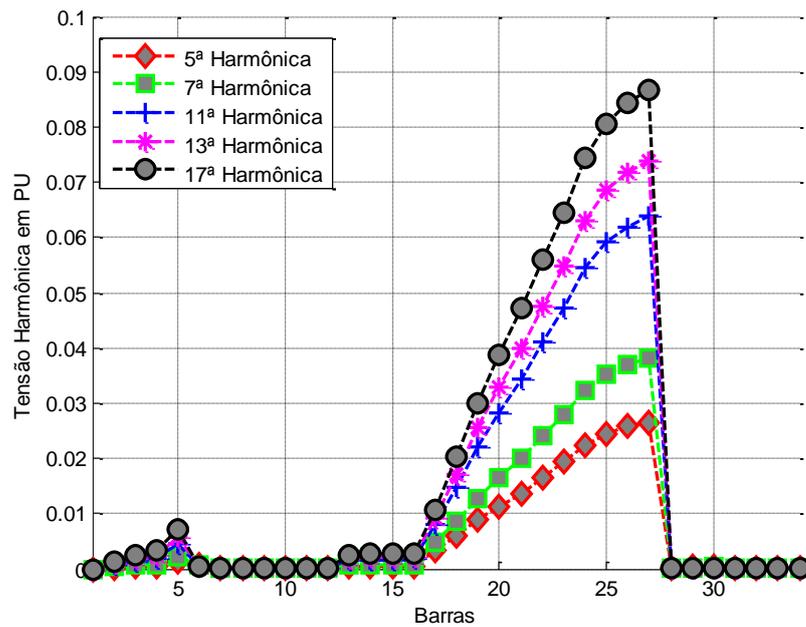
Tabela 5-7: Resultados para a Solução C

Barras	Banco (kvar)	V (pu)	THD (%)	S	$V_{rms}$	$V_{pico}$	$I_{rms}$	Barras	Banco (kvar)	V (pu)	THD (%)	S	$V_{pico}$	$I_{rms}$
1	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18	0	0,98	3,30	0,00	0,00	0,00
2	0	1,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	19	0	0,98	4,91	0,00	0,00	0,00
3	0	1,00	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	20	0	0,98	<b>6,34</b>	0,00	0,00	0,00
4	1200	0,99	0,48	1,00	1,00	1,07	1,00	21	0	0,99	<b>7,75</b>	0,00	0,00	0,00
5	600	0,99	1,06	1,01	1,00	1,15	1,00	22	0	0,99	<b>9,25</b>	0,00	0,00	0,00
6	1200	0,99	0,13	1,00	1,00	1,02	1,00	23	0	0,99	<b>10,69</b>	0,00	0,00	0,00
7	1200	0,98	0,01	1,00	1,00	1,00	1,00	24	0	1,00	<b>12,36</b>	0,00	0,00	0,00
8	0	0,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25	0	1,00	<b>13,42</b>	0,00	0,00	0,00
9	1200	0,98	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	26	0	1,00	<b>14,07</b>	0,00	0,00	0,00
10	0	0,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	27	0	1,01	<b>14,49</b>	0,00	0,00	0,00
11	300	0,98	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	28	600	0,98	0,02	1,00	1,00	1,00
12	0	0,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	29	1200	0,98	0,05	1,00	1,00	1,01
13	0	0,99	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	30	0	0,98	0,08	0,00	0,00	0,00
14	0	0,99	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00	31	1200	0,98	0,01	1,00	1,00	1,00
15	0	0,99	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	32	0	0,98	0,01	0,00	0,00	0,00
16	0	0,99	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	33	300	0,98	0,01	1,00	1,00	1,00
17	0	0,98	1,76	0,00	0,00	0,00	0,00	34	0	0,98	0,01	0,00	0,00	0,00
Objetivo 1	0.019601918824109													
Objetivo 2	\$42.547,32													

Nota-se que os limites de operação dos bancos de capacitores são calculados somente quando a banco de capacitores instalados na barra quando não existe banco instalado os valores não são calculados.

Outrossim, pela Figura 5-15 notamos claramente que as ordens harmônicas 11<sup>a</sup>, 13<sup>a</sup> e 17<sup>a</sup> violam os limites de 3% para  $IHD_v$ , ficando fora dos limites recomendados.

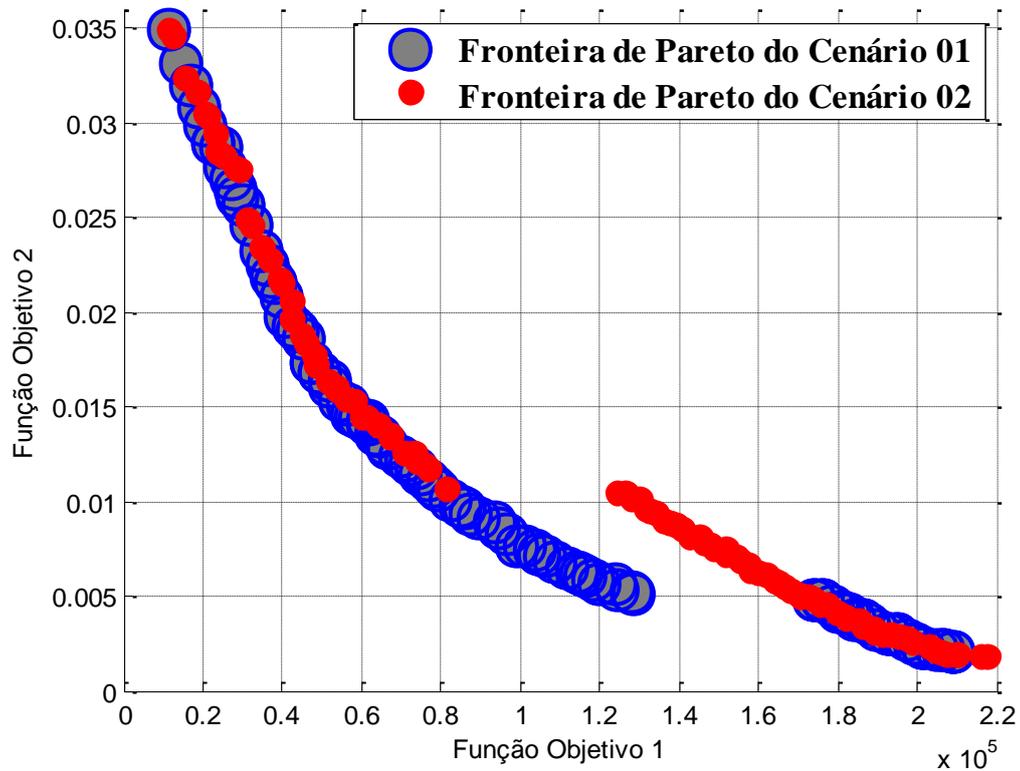
Figura 5-15: Conteúdo harmônico detalhado da solução do Cenário 02



### 5.6.8. Análise de convergência cenário 02

Como mencionamos no item 5.6.3, utilizou-se como técnica de inicialização da população inicial o conjunto de soluções de Pareto da simulação do Cenário 01 para verificar se o algoritmo convergia para uma curva que se aproximasse da origem do plano cartesiano, ou seja buscando a Fronteira de Pareto Ótima. Na Figura 5-16 imprimimos as duas fronteiras de Pareto de ambos os cenários e verificamos que ambas convergiram para regiões semelhantes, ou seja, o algoritmo passou todas as 250 gerações e não conseguiu encontrar uma fronteira que dominasse a curvas do cenário anterior. Vale ressaltar que a diferença entre as duas fronteiras fica por conta das violações das restrições dos critérios de desigualdades para ambos os cenários. Notamos também o espalhamento das 100 soluções que compõem a fronteira entre as duas curvas que pode ser utilizado como critério de parada.

Figura 5-16: Soluções dos cenários 01 e 02



Uma análise que deve ser relatada é referente à suposta superposição das duas Fronteiras. Isto não ocorre, pois, o espaço dos objetivos é discreto e cada um dos 200 pontos são distintos (cem de cada fronteira), com exceção de dois que coincidem que é a solução mais barata encontrada, Solução A, que foi analisada no item 5.5.5 apenas sob a perspectiva da restrição de distorção harmônica, ou seja, a Solução A pertence as duas fronteiras. A Tabela 5-8 traz a complementação das informações da Solução A sob a ótica das restrições de RI, na qual exhibe os valores obtidos através das inequações em (5-2). É de fácil percepção que de fato a Solução A não violou nenhuma das duas metodologias até então propostas. O perfil de tensão harmônica permanece o mesmo uma vez que as fontes de injeção harmônica não mudaram tão pouco houve instalação de outro banco na rede e, portanto, continua o mesmo da Figura 5-6.

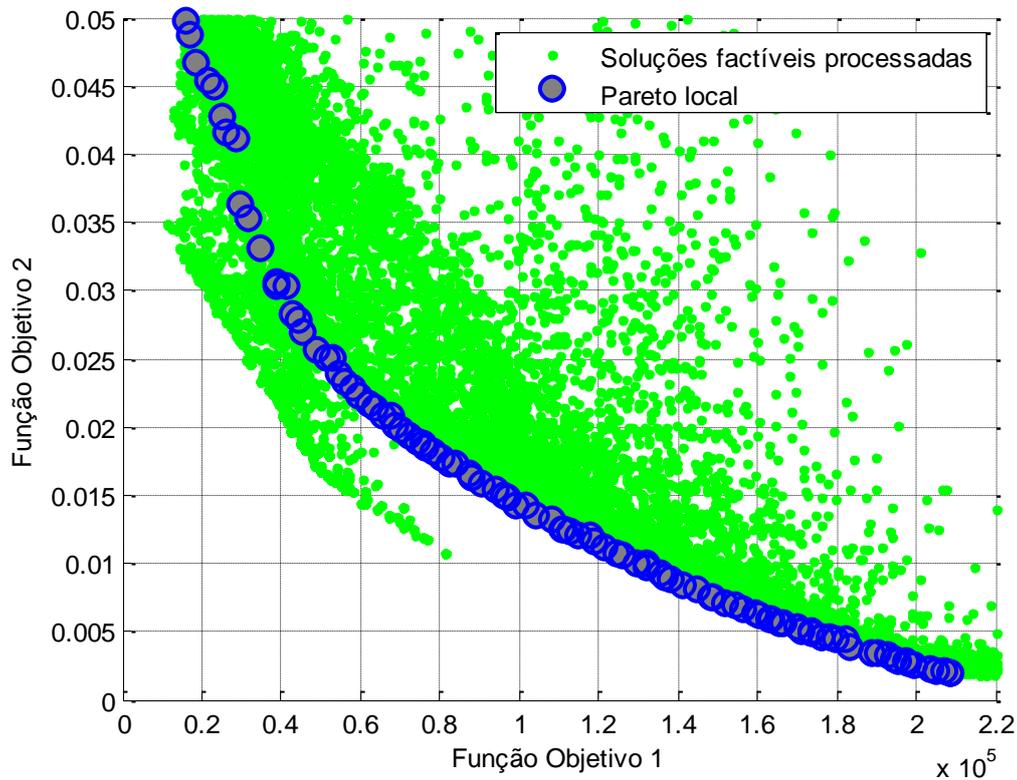
Tabela 5-8: Inserção da Análise de RI na solução A

Barras								Barras							
Banco	V	THD						Banco	V	THD					
(kvar)	(pu)	(%)						(kvar)	(pu)	(%)					
1	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18	0	0,98	1,32	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0	1,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	19	0	0,98	1,72	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0	0,99	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	20	0	0,98	2,08	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0	0,99	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	21	0	0,98	2,43	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0	0,98	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	22	0	0,98	2,79	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0	0,98	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	23	0	0,98	3,14	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0	0,97	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	24	0	0,99	3,53	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0	0,97	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	25	0	0,99	3,77	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0	0,97	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	26	0	0,99	3,92	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0	0,97	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	27	0	0,99	4,03	0,00	0,00	0,00	0,00
11	600	0,97	0,01	1,00	1,00	1,00	1,00	28	0	0,97	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0	0,97	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	29	300	0,97	0,04	1,00	1,00	1,01	1,00
13	0	0,99	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	30	0	0,97	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0	0,99	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	31	600	0,97	0,01	1,00	1,00	1,00	1,00
15	0	0,99	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	32	0	0,97	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
16	0	0,99	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	33	0	0,97	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
17	0	0,98	0,93	0,00	0,00	0,00	0,00	34	0	0,97	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Objetivo 1								0,034863							
Objetivo 2								\$11.204,33							

Vale a pena abrir um parêntese e ressaltar que a Solução A obedeceu às duas metodologias propostas e fará parte da fronteira do terceiro cenário que ainda não foi proposto, mas nada mais é do que as duas restrições (RI e distorção harmônicas juntas).

Voltando a análise da convergência, a fronteira obtida com a técnica da inicialização da população inicial com as fronteiras de Pareto para o Cenário 01 foi a melhor que se obteve durante todas as simulações realizadas. Ao inicializarmos a população como sendo gerada aleatoriamente temos que a resposta do programa é na verdade uma fronteira de Pareto Ótima local (Figura 5-17). Portanto podemos concluir que o critério de parada como sendo o número de geração não é suficiente para obter a solução ótima de Pareto. Vale ressaltar que não há como afirmar que a fronteira obtida na Figura 5-16 é a Ótima de Pareto, uma vez que se desconhece os espaços dos objetivos por ser um problema não linear, discreto de natureza de explosão combinatória.

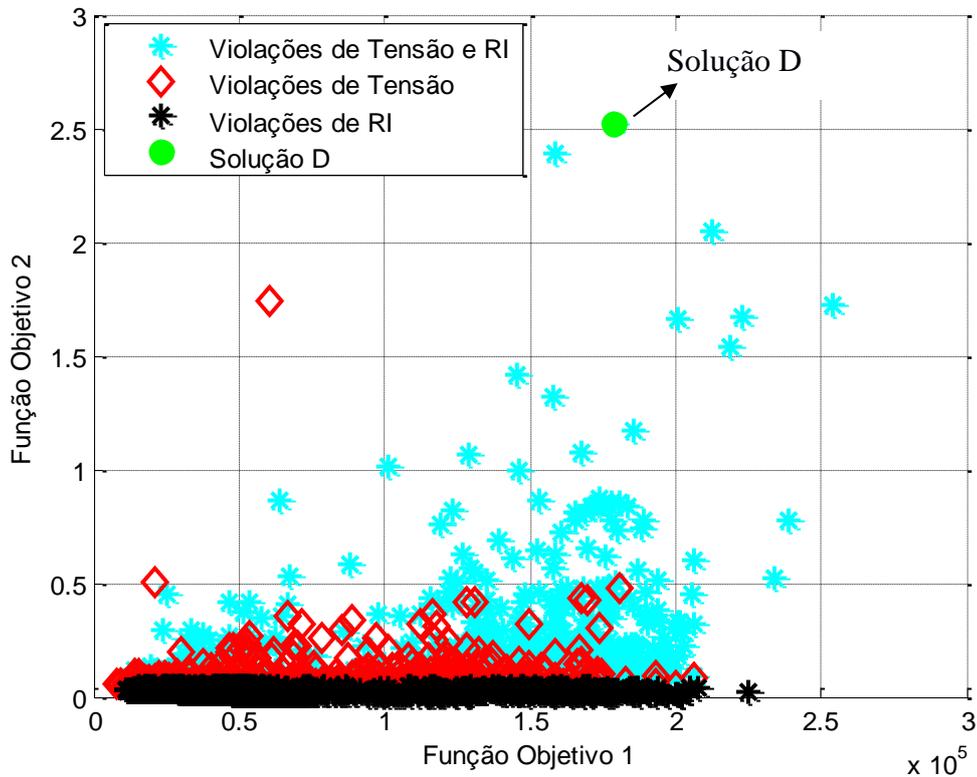
Figura 5-17: Pareto local obtido no espaço dos objetivos para o cenário 02



### 5.6.9. Ocorrência de ressonância e amplificação de tensão harmônica: Cenário 02

Como relatado no item 5.5.5, somente a violação do critério do THD e IHD não é suficiente para afirmar que houve a ocorrência dos fenômenos de amplificação e ressonância harmônica vista pelo banco de capacitor instalado em uma barra do sistema. Assim introduziu-se a análise do RI para que fosse garantida a operação segura dos bancos e verificar se esse critério seria suficiente para obedecer aos limites de distorção harmônica. O programa proposto na metodologia monitorou todas as violações de RI que ocorreram e foram eliminadas do processo, mas foram registradas. A Figura 5-18 mostra todas as soluções processadas e nela podemos notar que o programa eliminou 1013 soluções que violaram os perfis de tensão das barras em conjunto com o RI (pontos na cor ciano), que podem significar a ocorrência dos fenômenos de ressonância e/ou amplificação de tensão harmônica.

Figura 5-18: Violações Processadas na simulação do cenário 01



Para exemplificar o exposto, a Tabela 5-9 mostra os dados de simulação da Solução não factível D. Da tabela verificamos que a barra 4, simplesmente violou todos os critérios possíveis com  $I_{rms} = 5,2$ ,  $THD_v = 22,31$ , tensão na barra de 3,52 p.u.. Vale ressaltar que a solução D, além de violar todos os limites possíveis apresentados, torna-se inviável pela quantidade de BC's sugeridos pelo algoritmo. Mas outrossim, para evitar soluções com uma grande quantidade muito grande de bancos de capacitores (como a da Tabela 5-9), pode-se incluir uma restrição de:

- Número máximo de BC's
- Valor monetário disponível para investimentos.

Tabela 5-9: Resultados para a Solução D.

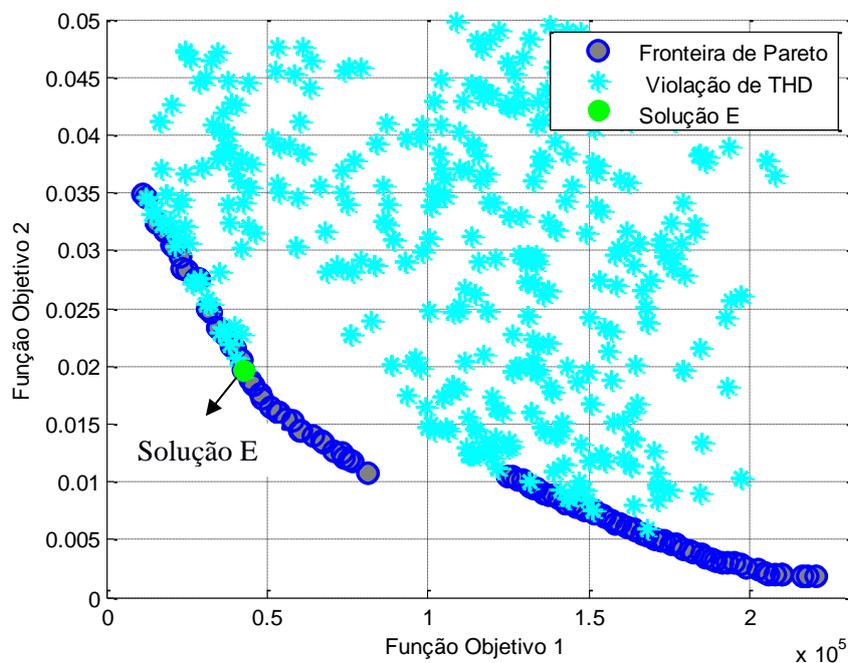
<b>Barras</b>	<b>Banco (kvar)</b>	<b>V (pu)</b>	<b>THD (%)</b>	<b>S</b>	<b><math>V_{rms}</math></b>	<b><math>V_{pico}</math></b>	<b><math>I_{rms}</math></b>
1	0	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0	1,029	2,262	0,000	0,000	0,000	0,000
3	<b>1200</b>	<b>1,057</b>	<b>4,320</b>	<b>1,025</b>	<b>1,000</b>	<b>1,242</b>	<b>1,015</b>
4	<b>1200</b>	<b>3,518</b>	<b>222,306</b>	<b>6,435</b>	<b>1,078</b>	<b>7,683</b>	<b>5,199</b>
5	<b>1200</b>	<b>1,993</b>	<b>235,835</b>	<b>7,071</b>	<b>1,091</b>	<b>8,297</b>	<b>5,626</b>
6	<b>1200</b>	<b>1,209</b>	<b>15,989</b>	<b>1,234</b>	<b>1,001</b>	<b>1,922</b>	<b>1,192</b>
7	600	0,838	12,567	1,176	1,001	1,802	1,142
8	300	1,008	57,174	1,335	1,002	2,015	1,285
9	1200	1,050	12,890	1,017	1,000	1,181	1,010
10	300	0,992	0,668	1,004	1,000	1,074	1,001
11	300	1,095	9,963	1,041	1,000	1,332	1,028
12	600	0,968	2,889	1,005	1,000	1,084	1,002
13	1200	1,009	0,690	1,002	1,000	1,035	1,000
14	300	0,946	4,195	1,024	1,000	1,244	1,014
15	0	1,206	23,127	0,000	0,000	0,000	0,000
16	300	1,037	2,576	1,011	1,000	1,154	1,006
17	300	1,075	5,868	1,044	1,000	1,355	1,030
18	1200	0,953	3,427	1,016	1,000	1,180	1,009
19	1200	1,024	2,089	1,007	1,000	1,104	1,003
20	1200	1,000	0,316	1,001	1,000	1,031	1,000
21	1200	0,994	0,154	1,001	1,000	1,013	1,000
22	1200	0,995	0,036	1,000	1,000	1,003	1,000
23	600	0,993	0,036	1,000	1,000	1,005	1,000
24	1200	0,992	0,007	1,000	1,000	1,001	1,000
25	1200	0,992	0,005	1,000	1,000	1,001	1,000
26	1200	0,992	0,003	1,000	1,000	1,000	1,000
27	0	0,992	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000
28	0	0,917	6,285	0,000	0,000	0,000	0,000
29	600	0,997	0,004	1,000	1,000	1,000	1,000
30	0	1,077	6,283	0,000	0,000	0,000	0,000
31	600	0,993	0,472	1,002	1,000	1,053	1,001
32	0	0,994	0,210	0,000	0,000	0,000	0,000
33	600	0,996	0,022	1,000	1,000	1,003	1,000
34	300	0,995	0,010	1,000	1,000	1,001	1,000
Objetivo 1				2,52			
Objetivo 2				\$178.439,28			

### 5.6.10. Análise do Cenário 02 x Restrições harmônicas

A operação de bancos de capacitores dentro dos limites estabelecidos pela IEEE 1036-2010 irá garantir que os mesmos tenham sua vida útil prolongada. Entretanto, esses quatro limites não são suficientes para garantir que os bancos operem dentro dos limites estabelecidos pela IEEE 519-2014. Para comprovar esta afirmação vamos considerar a atual simulação do Cenário 2, e utilizando seus dados armazenados, computou-se as ocorrências de violação do  $THD_v$  e  $IHD_v$ , as quais não foram rechaçadas no decurso deste processo de otimização. Sob essa perspectiva é possível observar na Figura 5-19 as soluções que violariam os limites de distorção harmônica, caso estes fossem monitorados durante a simulação do Cenário 2, grafadas em ciano.

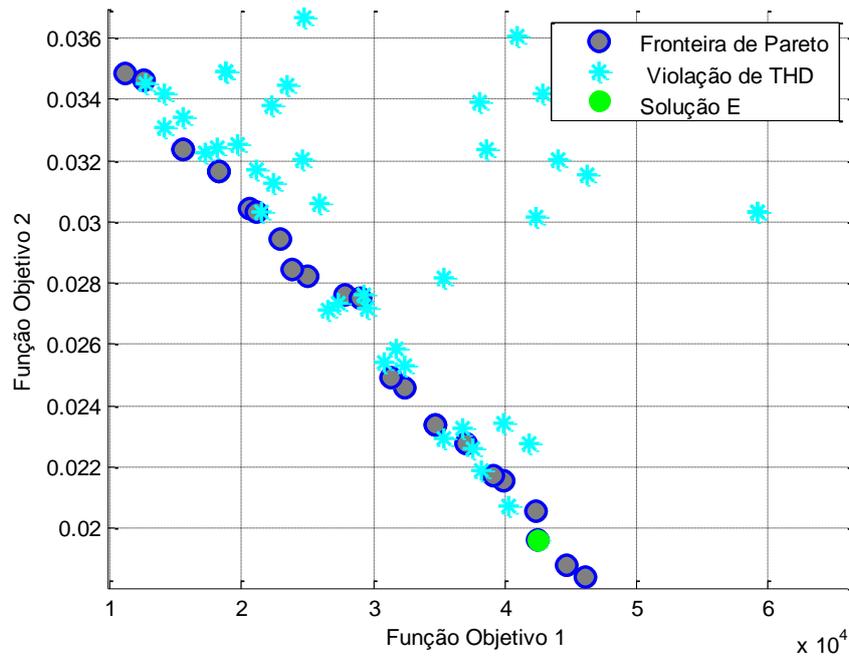
Nesta figura, observa-se que a primeira região da fronteira de Pareto formadas por  $F_1 < 8.2 \times 10^5$  é uma região do espaço dos objetivos no qual ocorre incidência de violações da distorção harmônica.

Figura 5-19: Cenário 02 com as soluções processadas que violaram os limites para  $THD_v$  e  $IHD_v$



Tantas violações próximas umas às outras dificultaram a análise gráfica, por isso plotamos a Figura 5-20 para analisarmos melhor a incidência do  $THD_v$  e  $IHD_v$  na solução do Cenário 02.

Figura 5-20: Ampliação da primeira região da fronteira de Pareto onde ocorre as Violação de distorção harmônicas.



Fica evidente que a região em epígrafe, da simulação do Cenário 02, faz parte da região de indiferença quando analisamos a dominância entre as soluções que violam a distorção harmônica e a do conjunto de Pareto obtido no Cenário 2. Tal fato é que a Solução E viola as distorções harmônicas e faz parte da fronteira de Pareto. Mostra-se o detalhamento da Solução E na Tabela 5-10, comprovando que as barras 20 a 27 estão acima do limite de 5% para o  $THD_v$ .

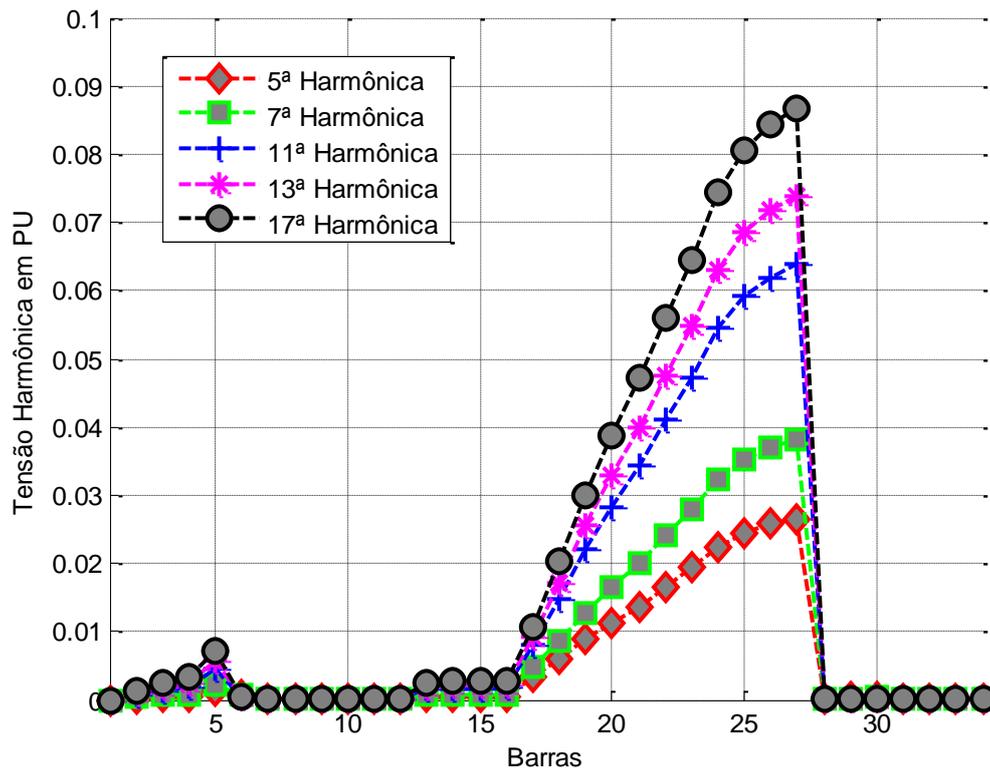
Tabela 5-10: Análise da Solução E

<b>Barras</b>	<b>Banco (kvar)</b>	<b>V (pu)</b>	<b>THD (%)</b>	<b>S</b>	<b><math>V_{rms}</math></b>	<b><math>V_{pico}</math></b>	<b><math>I_{rms}</math></b>
1	0	1	0,00	0	0	0	0
2	0	0,99744	0,18	0	0	0	0
3	0	0,99547	0,34	0	0	0	0
4	1200	0,99206	0,48	1,00386	1,00001	1,07333	1,00116
5	1200	0,98617	1,06	1,01007	1,00003	1,15301	1,00463
6	1200	0,98633	0,13	1,00064	1	1,02143	1,00006
7	1200	0,9838	0,01	1,00004	1	1,00171	1
8	0	0,98264	0,00	0	0	0	0
9	1200	0,98155	0,00	1,00001	1	1,00043	1
10	0	0,98093	0,00	0	0	0	0
11	300	0,98053	0,00	1,00001	1	1,00047	1
12	0	0,9804	0,00	0	0	0	0
13	0	0,99472	0,36	0	0	0	0
14	0	0,99387	0,39	0	0	0	0
15	0	0,99356	0,40	0	0	0	0
16	0	0,99348	0,41	0	0	0	0
17	0	0,98466	1,76	0	0	0	0
18	0	0,98442	3,30	0	0	0	0
19	0	0,98329	4,91	0	0	0	0
20	0	0,98386	<b>6,34</b>	0	0	0	0
21	0	0,98603	<b>7,75</b>	0	0	0	0
22	0	0,98663	<b>9,25</b>	0	0	0	0
23	0	0,98933	<b>10,69</b>	0	0	0	0
24	0	0,9951	<b>12,36</b>	0	0	0	0
25	0	1,00055	<b>13,42</b>	0	0	0	0
26	0	1,00466	<b>14,07</b>	0	0	0	0
27	0	1,00729	<b>14,49</b>	0	0	0	0
28	600	0,98351	0,02	1,00008	1	1,00325	1
29	1200	0,98319	0,05	1,00021	1	1,0081	1,00001
30	0	0,9827	0,08	0	0	0	0
31	1200	0,98096	0,01	1,00001	1	1,00058	1
32	0	0,98074	0,01	0	0	0	0
33	300	0,98066	0,01	1,00001	1	1,0009	1
34	0	0,9806	0,01	0	0	0	0
Objetivo 1				0,02			
Objetivo 2				\$42.547,32			

Para comprovar a violação em  $IHD_v$  o programa imprime a Figura 5-21 com o conteúdo das harmônicas por barra do sistema.

Nesse sentido, prova-se que a análise somente do  $RI$  é insuficiente para garantir que não sejam violados os critérios de  $THD_v$  e  $IHD_v$ .

Figura 5-21: Conteúdo harmônico detalhado da Solução E do Cenário 02 em cada barra



### 5.6.11. Considerações finais:

Com tudo o que foi exposto, torna-se evidente a necessidade dos limites de restrição harmônica nas redes de distribuição antes de se executar a alocação de banco de capacitores, uma vez que uma solução que viola algum critério do  $RI$  irá diminuir a vida útil e nos piores casos provocar uma descarga rápida danificando permanentemente o BC. Vale ressaltar que este critério não é suficiente para garantir que não ocorram distorções harmônicas acima do permitido nas barras.

### 5.7. Cenário 3: Inclusão das restrições de THD, IHD e RI ao PABC

Para o terceiro cenário foram consideradas as restrições relativas ao THD, IHD e RI. Como fora mencionado, quando somente um dos dois cenários supracitados é considerado, não há garantia de isenção das soluções quanto a ressonância harmônica e/ou violações dos limites de distorção harmônica. Nessa seara, surgiu a proposta para o terceiro cenário. Logo o PABC com Restrições de THD, IHD e RI e definido em (5-3):

$$\left. \begin{aligned}
 \min F_1 &= k_a \sum_{m=1}^{N_b} (C_b) + k_b \sum_{n=1}^{N_b-1} (P_f + P_h) \\
 \min F_2 &= \text{máx} \left\| V_{REF} - \vec{V}_j \right\| \\
 \text{s. a} \\
 \left\| V_{REF} - \vec{V}_j \right\| &\leq 0.5 \text{ p.u.} \\
 IHD_v &\leq 3\% \\
 THD_v &\leq 5\% \\
 \sqrt{1 + \sum_n \left( \frac{\alpha_n}{n} RI_n \right)^2} \cdot \sqrt{1 + \sum_n (\alpha_n RI_n)^2} &\leq 135\% \\
 \sqrt{1 + \sum_n \left( \frac{\alpha_n}{n} RI_n \right)^2} &\leq 110\% \\
 1 + \sum_n \left( \frac{\alpha_n}{n} RI_n \right) &\leq 120\% \\
 \sqrt{1 + \sum_n (\alpha_n RI_n)^2} &\leq 180\%
 \end{aligned} \right\} \quad (5-3)$$

#### 5.7.1. Inicialização da população inicial para o Cenário 03

Com o intuito de obter a Fronteira ótima para o problema realizamos a inicialização da população inicial para esta metodologia. Na população  $P_1$ , utilizou-se a fronteira de Pareto do Cenário 01, e na população  $Q_1$ , substituímos o resultado dos operados genéticos pela fronteira de Pareto do Cenário 02. Este será o ponto de partida da simulação que será discutida neste trabalho, para verificar se o algoritmo converge para uma nova região ou fica estagnado na mesma.

### 5.7.2. Estatísticas da simulação do Cenário 03

O programa foi desenvolvido inteiramente em MATLAB® pelo autor desta dissertação de mestrado tanto quanto a rotina principal e as suas sub-rotinas (operadores genéticos, ordenar por dominância, distância de multidão, fluxo de carga na fundamental e nas harmônicas). Na Tabela 5-11 mostram-se algumas estatísticas da simulação do Cenário 03.

Tabela 5-11: Estatísticas da simulação do Cenário 03

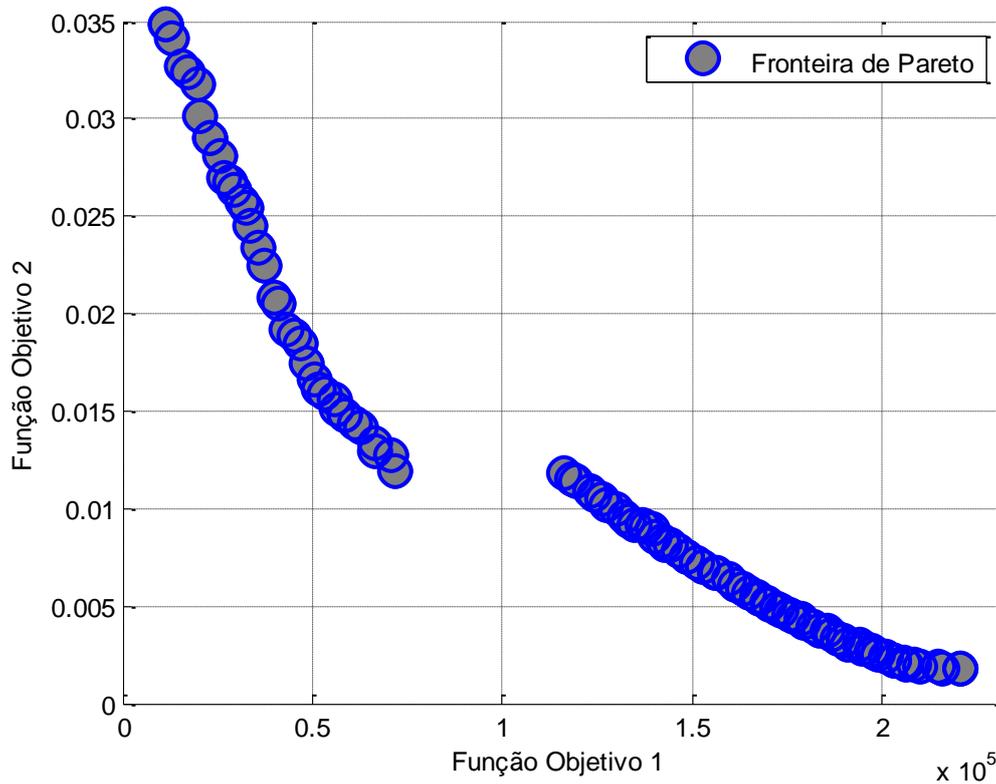
Dados da Simulação	
Tempo de simulação	39min 47.40sec
Geração	250
Tamanho da População	100
Inicialização da População inicial	Pareto Cenário 01 e 02
Taxa de mutação	1,47%
Taxa de Cruzamento	90%
Variáveis (número de barras)	34
Soluções Processadas	29.695
Soluções factíveis	25.000
Violações da restrição de igualdade	953
Violações somente do limite do RI	1907
Violações do limite de RI e THD	273
Violações somente do limite de tensão	848
Violações do limite de tensão e RI	326
Violações dos limites de tensão, RI e THD	817
Violações dos limites de tensão e THD	295
Violações somente do limite THD	229
Fluxos de carga executados	178.170
Equivalentes Thevenin processados	16.016.070

Nota-se imediatamente que o tempo de simulação é quase o triplo do Cenário 1, isso se dá pelo fato de que o processo para calcular o valor do RI depende do calcula da impedância equivalente de Thevenin para cada BC instalado na rede, além do fato de que com o maior número de restrições de desigualdade maior é o tempo necessário para substituí-las.

### 5.7.3. Resultado da simulação do cenário 03

A Figura 5-22 mostra os resultados da simulação para o Cenário 03 que nada mais é do que a fronteira de Pareto com cem soluções classificadas na primeira fronteira. Vale ressaltar que em todas as simulações deste trabalho considerou-se que o sistema não continha BC's previamente instalados no sistema. Como resposta o programa imprime a fronteira de Pareto obtida pelo NSGA-II. De forma análoga ao cenário anterior a resposta é formada por duas regiões descontínuas que formam um *gap* na fronteira desta simulação.

Figura 5-22: Fronteira de Pareto para o Cenário 03



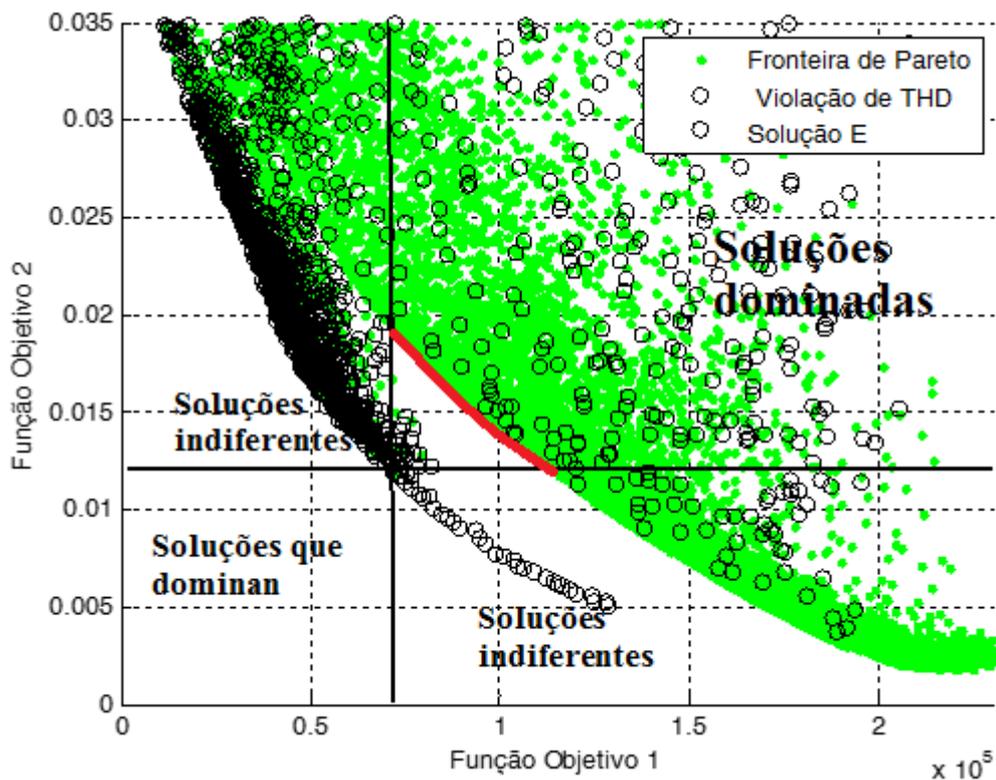
### 5.7.4. Análise da formação do *gap* do Cenário 03

A formação do *gap* na Figura 5-22 tem a mesma explicação que fora dada no item 5.5.5. Vale ressaltar que a região de ocorrência do *gap* não é a mesma da Figura 5-5. Na simulação dos Cenários anteriores ocorreram em  $1.3 \times 10^5 \leq f_1 \leq 1.7 \times 10^5$ ,  $0.8 \times 10^5 \leq f_1 \leq 1.1 \times 10^5$

para os cenários 01 e 02 respectivamente, mas na simulação deste Cenário ela fica no meio dos dois *gap*'s:  $0.7 \times 10^5 \leq f_1 \leq 1.15 \times 10^5$ .

Esse deslocamento ocorreu devido a mudança no espaço dos objetivos com a inserção das quatro restrições de índice de ressonância mais a restrição da distorção harmônica ao PABC. Essa mudança no espaço é melhor visualizada ao imprimir em conjunto com as soluções factíveis as soluções que violaram somente os limites de RI e THD. Para isso plota-se a Figura 5-23, na qual mostra que o *gap* formado pelo Cenário 03 foi formado por soluções que violaram o RI impedindo que ele se desloque para a direita e acaba formando o *gap* (região em vermelho).

Figura 5-23: Violação do RI em conjunto com as soluções factíveis



### 5.7.5. Análise de uma solução da Fronteira do Cenário 03.

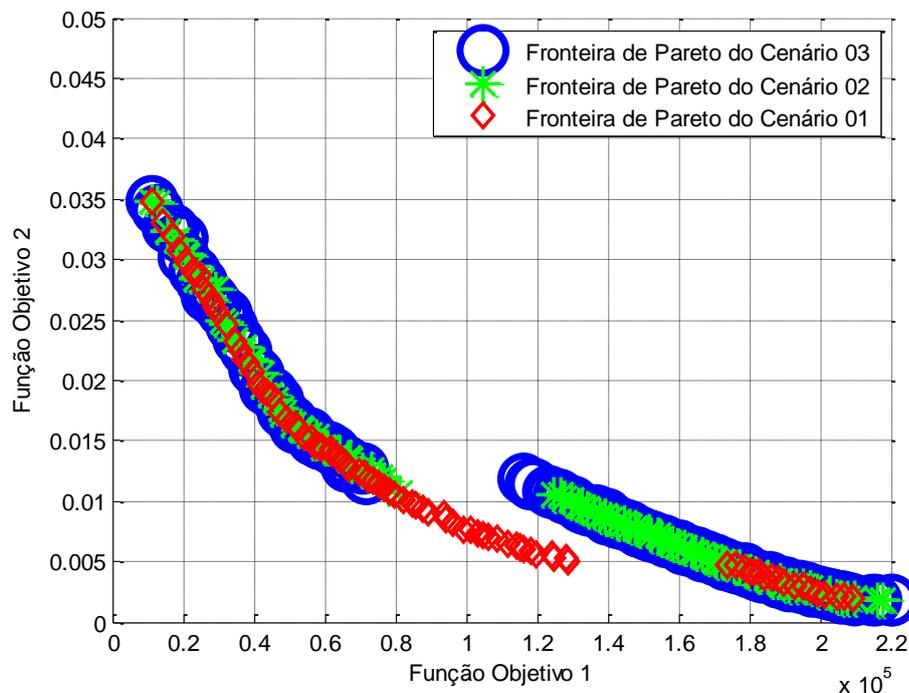
Como mencionamos no item 5.6.8, a Solução A permaneceu na fronteira do Cenário 3, e isto somente é possível não somente pelo fato do algoritmo não conseguir encontrar uma solução que a domine, mas pelo fato de que como ela foi inicializada na primeira população,

sempre recebera um valor de distância de multidão igual ao infinito por estar na extremidade da região dominante, portanto sempre irá compor a próxima geração até que seja processada uma solução que a domine. Os dados de análise da Solução A são as mesma da Tabela 5-8.

### 5.7.6. Análise de convergência cenário 03

Como mencionamos no item 5.7.1, utilizou-se como técnica de inicialização da população inicial o conjunto de soluções de Pareto das simulações dos Cenário 01 e 02 para verificar se o algoritmo convergia para uma curva que se aproximasse da origem do plano cartesiano, ou seja buscando a Fronteira de Pareto Ótima. Na Figura 5-16 imprimimos três fronteiras de Pareto de todos os cenários e verificamos que ambas convergiram para a “mesma região”, ou seja, o algoritmo passou todas as 250 gerações e não conseguiu encontrar uma fronteira que dominasse a região do cenário anterior. Vale ressaltar que a fronteira da região 1 foi diminuindo à medida que foram inseridas as demais restrições dos outros cenários ao PABC. Análise análoga pode ser feita a região 2, mas notamos o aumento da região.

Figura 5-24: Soluções dos cenários 01, 02 e 03

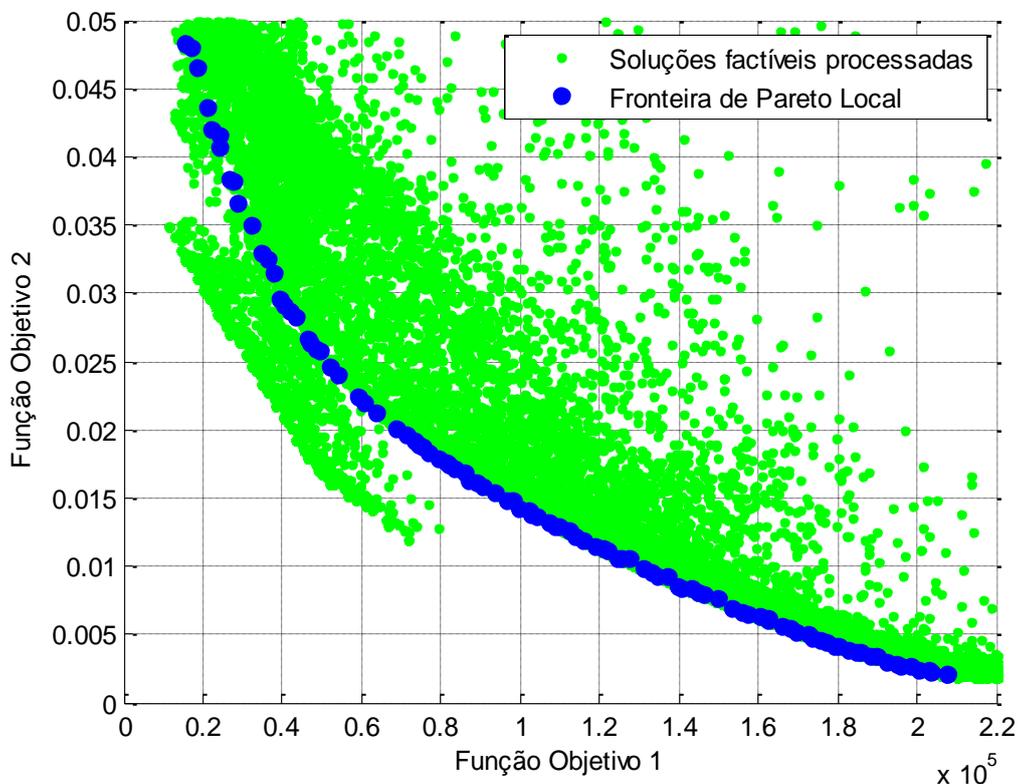


Uma análise que deve ser relatada é referente a suposta superposição das três Fronteiras. Como explano no item 5.6.8 as fronteiras estão na mesma região, mas são soluções distintas entre si. A única exceção regra é a Solução A que foi analisada no item 5.5.5 e pertence as três fronteiras dos três cenários.

Voltando a análise da convergência a fronteira obtida com a técnica da inicialização da população inicial ( $P_1$ ) com a fronteira de Pareto para o Cenário 01 e a população  $Q_1$  sendo inicializada com a fronteira de Pareto do Cenário 02, foi a melhor que se obteve durante todas as simulações realizadas. Ao inicializarmos a população como sendo gerada aleatoriamente temos que a resposta do programa é na verdade uma fronteira de Pareto Ótima local (Figura 5-17). Portanto podemos concluir que o critério de parada como sendo o número de geração não é suficiente.

A diferença entre as Figura 5-25 e Figura 5-17 fica por conta somente da redução do espaço dos objetivos para as soluções que compõem a região 01 analisada no 5.7.4.

Figura 5-25: Pareto local obtido no espaço dos objetivos para o cenário 03



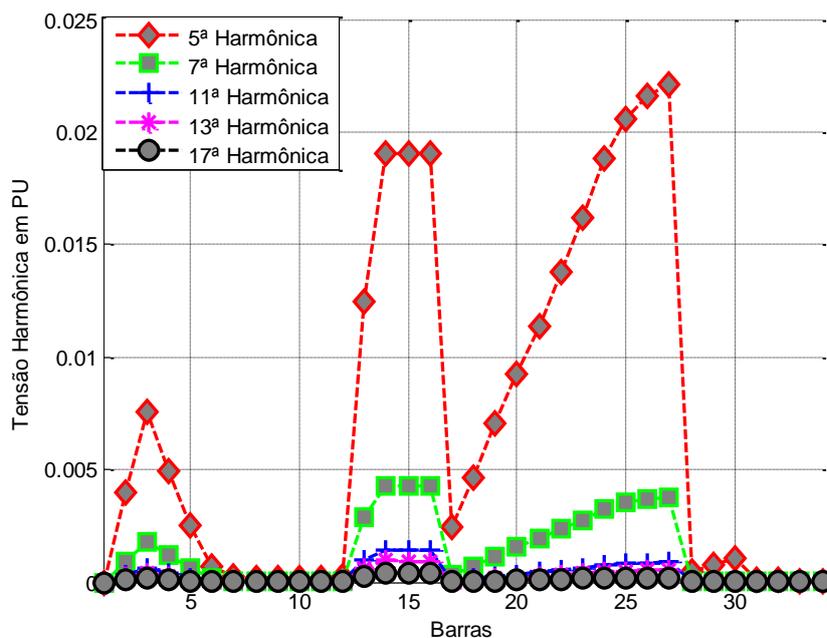
### 5.7.7. Considerações finais:

Com tudo o que foi exposto, torna-se evidente a necessidade dos limites de restrição harmônica nas redes de distribuição antes de se executar a alocação de banco de capacitores, uma vez que uma solução que viola algum critério do RI irá diminuir a vida útil e nos piores casos provocar uma descarga rápida danificado permanentemente o BC. Vale ressaltar que este critério não é suficiente para garantir que não ocorra distorções harmônica acima do permitido nas barras.

Neste tópico serão apresentadas algumas considerações advindas das análises realizadas nas simulações em todos os cenários.

A primeira delas é relativa ao perfil harmônico da solução média proveniente da Fronteira de Pareto. A Figura 5-26 mostra o perfil individual dos harmônicos para cada barra de onde se constata que todas as soluções apresentadas estão dentro do critério de IHD. Além disso, os níveis de distorção são maiores próximos às barras em que as fontes harmônicas foram posicionadas (comportamento já esperado) e decaem gradativamente em barras mais distantes às localizações das fontes.

Figura 5-26: Conteúdo harmônico detalhado de uma solução



## 5.8. Conclusões

Este capítulo apresentou o sistema teste utilizados para realizar as análises desenvolvidas nos três cenários, o ambiente computacional e o fluxograma do programa desenvolvido para otimizar o problema proposto.

Em seguida passou-se para análise dos três cenários que foram criados com o intuito de investigar se existe correlação entre as restrições de ressonância harmônica imposta pela IEEE 519-2014 e os limites de operação dos bancos de capacitores impostos pela IEEE 1036-2010 em conjunto com o índice de ressonância harmônica para mensurar a severidade da ressonância harmônica nos bancos de capacitores de potência.

Como cada um dos critérios não é suficiente para garantir o atendimento do outro este trabalho culminou na adoção do terceiro cenário que nada mais é do que a combinação dos dois primeiros com o intuito de garantir que as soluções apresentadas ao operador do programa estejam livres de ressonância harmônica e ainda que os BC's esteja operando dentro dos limites estabelecidos pela IEEE-1036 e desta forma estendendo a vida útil dos BC's fazendo com que as soluções adotadas sejam viáveis economicamente e ainda atendam todos os limites impostos pela legislação vigente.

# CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

## 6.1. Considerações finais

Este trabalho apresentou uma metodologia baseada no algoritmo de otimização multiobjetivo NSGA II para resolver o problema de alocação e dimensionamento ótimo de bancos de capacitores considerando a presença de cargas não lineares na rede de distribuição de energia elétrica.

Sob essa perspectiva, evidenciou-se a necessidade das concessionárias de distribuição de energia elétrica se adequarem a fatores como o crescimento da demanda e as peculiaridades de cada consumidor. Nesse sentido, foi mostrado que além dos problemas já conhecidos, novos desafios estão sendo impostos às concessionárias, as quais precisam ser mais cautelosas ao escolher os métodos para melhorar o serviço prestado, principalmente aqueles que, de alguma forma, já estão consagrados na literatura. Mostrou-se na ocasião que um desses métodos é a alocação ótima de bancos de capacitores visando, dentre outros objetivos, a diminuição das perdas ativas nas linhas. Foi mostrado que muitos trabalhos recentes consideram a influência das cargas não lineares na resolução desse problema.

Foi apontado também que a inobservância do conteúdo harmônico pode causar o fenômeno de ressonância harmônica, aumentando demasiadamente o nível de distorção harmônica na rede de distribuição. Nessa seara, foi observado que duas metodologias principais eram recorrentes na literatura vigente para diagnosticar os casos de ocorrência de amplificação ou ressonância harmônica: considerando os índices propostos pela Norma IEEE 519 e considerando a análise de RI advindo da Norma IEEE 1036.

Uma vez descrita a motivação do trabalho, passou-se à fase de levantamento das ferramentas para construção da metodologia proposta. Assim, foram abordados aspectos construtivos dos bancos de capacitores a fim de amadurecer o entendimento dos fatores que os levam ao mau funcionamento ou à condição de falha precoce. Foi apontado que um desses fatores é a distorção harmônica presente na rede em que o referido banco de capacitores se encontra instalado. Foram descritas também as condições necessárias para que possa ocorrer a ressonância harmônica dada a instalação do banco de capacitores.

Outro aspecto relevante que foi abordado neste trabalho, refere-se às técnicas de otimização multiobjetivo. Na ocasião, foram descritos os principais conceitos relacionados com a concepção multiobjetivo tais como a Fronteira de Pareto, o conceito de Dominância e a análise das soluções no espaço dos objetivos. Foi apresentado o algoritmo NSGA II, sendo elencadas as suas principais características bem como a forma como se dá o processo de otimização quando tal algoritmo é utilizado.

Uma vez descritas as ferramentas necessárias, passou-se à composição da metodologia proposta neste trabalho. Todos os algoritmos utilizados foram desenvolvidos durante a execução de um P&D com a Companhia de Eletricidade do Amapá. Para tal, utilizou-se o MATLAB R2014b. Foram apresentados os pseudocódigos dos algoritmos desenvolvidos. Percebeu-se que o desenvolvimento de códigos próprios em detrimento ao uso de ferramentas de otimização já existentes propiciou o total domínio sobre a simulação, sendo possível, inclusive, intervir com o conhecimento especialista para melhoria na convergência do sistema. Além disso, foi possível ter acesso a qualquer conjunto de dados para análises posteriores haja vista terem sido registrados todas as variáveis relevantes da simulação.

Vale ressaltar a contribuição deste trabalho no desenvolvimento do código devido as melhorias de desempenho para a codificação binária ao aplicar a álgebra booleana para deduzir as expressões para os operadores genéticos.

Subsidiado pelo código computacional elaborado, foram realizadas análises em 3 cenários, diferenciados pela forma com que era abordada a indicação de ocorrência de ressonância harmônica. O primeiro cenário fez uso somente do THD e IHD para monitorar as ocorrências de ressonância harmônica. Conforme fora dito, essa é a abordagem mais adotada nos trabalhos que tratam do assunto. Foi apresentado o segundo cenário em que se utilizou somente o RI. Essa estratégia ainda é pouco usada e mostra as consequências da ressonância harmônica através dos limites dos próprios bancos de capacitores instalados na rede de distribuição. Por fim, foi proposto o terceiro cenário que inclui todos os índices dos dois cenários anteriores. Por meio das análises das simulações realizadas para o primeiro e segundo cenários, concluiu-se que é necessário o uso do terceiro cenário de modo que tanto os casos de violação de THD e IHD quanto aqueles que violam o RI sejam monitorados, garantindo assim a segurança da rede de distribuição e de seus elementos. Através do monitoramento de todos parâmetros de ressonância harmônica em todos os cenários foi possível observar que muitas das soluções que deveriam ser rechaçadas no Cenário 1 (com a ausência do RI) ou no Cenário 2 (com o THD e

IHD ausentes) apareciam na composição da Fronteira de Pareto final de cada um desses cenários. Dessa maneira, a solução mais sensata é observar ambos cenários simultaneamente, tal como proposto no terceiro cenário.

Conclui-se, ainda, que para problemas de engenharia, tal como o abordado neste trabalho, o uso de técnicas multiobjetivo, em geral, é mais adequado, uma vez que possibilita a escolha de uma solução dentre várias disponíveis de modo conveniente ao projetista/operador.

Por fim, observa-se a importância da inserção de critérios que levem em consideração a ressonância harmônica no problema de alocação de bancos de capacitores, já que nem sempre a solução com menores perdas acabará sendo a solução isenta de falhas a curto prazo e, conseqüentemente, não será a solução mais viável do ponto de vista econômico.

## **6.2. Sugestões para trabalhos futuros**

Embora este trabalho tenha alcançado êxito naquilo que se propôs, ainda há muito a ser melhorado. Por isso, cabe elencar algumas sugestões para pesquisas futuras:

- a) A realização de testes com outras ferramentas de otimização, tanto aquelas baseadas em um único objetivo quanto as demais técnicas multiobjetivo. Isso propiciará comparações, podendo ser exploradas novas Fronteiras e posteriormente avalia-las a partir de métricas consolidadas na literatura.
- b) Realização de testes com sistemas trifásicos: sabe-se que as redes de distribuição radiais são, em regra, trifásicas e desbalanceadas. Realizar testes com este tipo de rede possibilitará avaliação da ocorrência de ressonância ao longo de todas as fases e em diferentes pontos de análise.
- c) Inserção de bancos de capacitores chaveados ao PABC que serão necessários com a variação da demanda por energia elétrica ao longo do tempo.
- d) Teste em sistemas reais em conjunto com campanhas de medições para levantamento do conteúdo harmônico das cargas não lineares que irão mudar drasticamente o espaço dos objetivos.

- e) Elaboração de métodos de decisão baseado em algoritmos de inteligência computacional a fim de reduzir o tempo empregado na simulação.
- f) Elaborar estudos de alocação dos BC's, considerando também, a variação da carga, por exemplo, nos patamares: leve, médio e pesado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL, Abdelsalam A.; EL-HAWARY, M. E. Optimal Capacitor Placement and Sizing in Unbalanced Distribution Systems With Harmonics Consideration Using Particle Swarm Optimization. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, Vol. 25, N. 3, Julho 2010.
- ANEEL. Resolução 505 de 2001
- ARRILAGA, J., BRADLEY D. A., e BODGER P. S., Power System Harmonics. New York: Wiley, 1983.
- ARRILAGA, J., e ARNOLD C. P., Computer Analysis of Power Systems. New York: Wiley, 1990.
- ARROYO, J. E. C. Heurísticas para otimização combinatória multiobjetivo. 2002. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.
- AMAZONAS FILHO, E, M, BEZERRA, U. H., JUCA, G. e REIS, M. R. Alocação de Bancos de Capacitores em Alimentadores de Distribuição Utilizando Função Objetivo Multicritério para Redução de Perdas e Minimização de Desvios de Tensão e Redução de Custos. In: XVI Seminário de Distribuição de Energia, 2004, Brasília. XVI Seminário de Distribuição de Energia, 2004.
- ANTUNES, C. H., OLIVEIRA, E., LIMA, P. A multi-objective GRASP procedure for reactive power compensation planning. Optimization Engineering, 2014.
- AZEVEDO, M. S. S., ABRIL, I. P., BENITEZ, C. L., LEITE, J. C., BEZERRA, U. H. Multiobjective optimization of the reactive power compensation in electric distribution systems. DYNA, 2013.
- AZEVEDO, M. S. S., ABRIL, I. P., LEITE, J. C., MEDEIROS, A. B., Capacitors Placement by NSGA-II in distribution systems with non-linear loads. International Journal of Electrical Power & Energy Systems 82, Elsevier .2016.
- AZIMI, R., ESMAEILI, S. Multiobjective daily Volt/VAr control in distribution systems with distributed generation using binary ant colony optimization. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences. 2013.

- BARAN, M.E., e WU, F. F., Optimal capacitor placement on radial distribution systems. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, No. 1, pp. 725-733, Jan. 1989.
- BEE, R. T. Alocação de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição Utilizando Algoritmo Genético. Dissertação de Mestrado. UFPR. Curitiba, 2007.
- CHIOU, Ji-Pyng, e CHANG, Chung-Fu. A Novel Evolutionary Algorithm for Capacitor Placement in Distribution Systems, GSTF Journal of Engineering Technology (JET), Vol. 2 No. 3, Dec 2013.
- CHIS, M., SALANA, N.M., JAYARAM, S. Capacitor placement in distribution systems using heuristic search strategies. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1997.
- DAVUDI, M., TORABZAD, S., e OJAGHI, B., A novel method to harmonic sources placement, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, pp. 1172-1179, 2011.
- DE JONG, K. A. Evolutionary computation: A unified approach. Cambridge, MA: MIT Press, 2006.
- DEB, K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- DUARTE, L. H. S. e ALVES, M. F. Degradação dos capacitores de potência sob a influência dos componentes harmônicos. XVI SNPTEE. Campinas, 2001.
- DUARTE, L. H. S.. Degradação dos capacitores de potência sob a influência dos componentes harmônicos. Dissertação de Mestrado. 173 f. UFMG. Belo Horizonte, 2000.
- DUGAN, R. C; McGranaghan, M.F; Beaty, H.W. “*Electrical Power Systems Quality*”, 3ª ed. McGraw-Hill, 1996.
- EAJAL, A.A. e EL-HAWARY, M.E., Optimal capacitor placement and sizing in distorted radial distribution systems part I: System modeling and harmonic power flow studies, presented at the Harmonics and Quality of Power 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Bérghamo, 2010.

- ESMAEILIAN, H. R., e FADAEINEDJAD, R.. Optimal reconfiguration and capacitor allocation in unbalanced distribution network considering power quality issues. 22nd International Conference on Electricity Distribution. Stockholm, 2013.
- FARD, A. K. e NIKNAM, T. Multi-objective stochastic Distribution Feeder Reconfiguration from the reliability point of view. Energy, 2014.
- FONSECA, W. A. S., BARROS, F. G. N., NUNES, M. V. A., BEZERRA, U. H., OLIVEIRA, R. C. L., Genetic Algorithms and Treatment of Multiples Objectives in the Allocation of Capacitor Banks in an Electric Power Distribution System. International Conference on Industrial Applications, INDUSCON-IEEE, 2010.
- GARCIA, F. R.. Cálculo da perda útil de capacitores em função da distorção harmônica existente nas redes de distribuição de energia elétrica. IV SBQEE. Porto Alegre, 2001.
- GARCIA, F. R. Efeitos harmônicos da aplicação de bancos de capacitores em indústrias eletrointensivas sobre a rede elétrica de alta tensão – casos reais. VI SBQEE. Belém, 2005.
- GASPAR-CUNHA, A. TAKAHASHI, R. ANTUNES, C.H. Manual de computação evolutiva e metaheurística. Belo Horizonte. Editora UFMG; Coimbra: impressa da universidade de Coimbra, 2013.
- GODOI, A. A. Alocação de bancos de capacitores em redes primária e secundária de energia elétrica. Dissertação de mestrado. UFPR. Curitiba, 2009.
- HAKIMI, S.M., ZARRINGHALAMI, M., e TAFRESHI, S. M. M. . Optimal Capacitor Placement and Sizing in Non-Radial Distribution to Improve Power Quality, IEEE, 2010.
- HUANG, Z., Xu, W. DINAHAHI, V. R.. “A Practical Harmonic Resonance Guideline for Shunt Capacitor Applications,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, pp 1382-1287, 2003.
- IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitor. IEEE std. 1036-2010, 2010.
- IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Standard 519-2014, IEEE, New York, 2014.

- IEE Task force on Harmonics Modeling and Simulation, "The modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks Part I: Concepts, models and simulation techniques," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.11, No.1, January 1996, pp. 452-46.
- LEE, K. Y. e EL-SHARKAWI, M. A.. Modern Heuristic Optimization Techniques Theory and Applications to Power Systems. 604 f. IEEE press, 2008.
- 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 – September 2016.
- MAMEDE Filho, J. Instalações elétricas industriais. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.
- MANITO, A. R. A.. Análise da Qualidade de Tensão no Ponto de Conexão de uma Fábrica de Alumínio com o Sistema Interligado Nacional. Dissertação de Mestrado. 161 f. UFPA, 2009.
- MASOUM, M. A. S.. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines. 2a edição. 1140 f. Academic Press, 2015.
- MCGRANAGAHN, M., PEELE, S. e MURRAY, D. Solving harmonic resonance problems on the medium voltage system. 19th International Conference on Electricity Distribution (CIRED). Viena, 2007.
- MILLER, E. H., Test systems for harmonics modeling and simulation, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 14, No. 2. April 1999.
- MIRJALILI, S.; MIRJALILI, S. M.; LEWIS, A.. Grey Wolf Optimizer. Advances in Engineering Software, Elsevier, 2014.
- MUTHUKUMAR, K. e JAYALALITHA, S. Harmony Search Approach for optimal capacitor placement and sizing in unbalanced distribution systems with harmonics consideration. International Conference On Advances In Engineering, Science And Management – ICAESM/IEEE. India, 2012.
- MUTHUKUMAR K., e JAYALITHA S., Optimal Reactive Power Compensation by Shunt Capacitor Sizing Using Harmony Search Algorithm in Unbalanced Radial Distribution

System for Power loss Minimization, International Journal on Electrical Engineering and Informatics - Volume 5, Number 4, December 2013.

NEAGLE, N.M., e SAMSOM, D.R. (1956). Loss reduction from capacitors installed on primary feeders. Trans. of the American Inst. of Electrical Engineers, Vol. PAS-75, No. 3, pp. 950-959.

PARETO, V.F.D. Manual de economia política(1909). Trad. de João Guilherme Vargas Netto. São Paulo: Nova Cultural, 1996, p. 13.

Partial discharge considerations in capacitor design. Cooper Power Systems, 2000.

PEREIRA JUNIOR, B. R. Alocação otimizada de bancos de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica através de metaheurísticas multiobjetivo. Dissertação de Mestrado. UNESP, 2009.

PIRES, D. F., ANTUNES, C. H., MARTINS, A. G. NSGA-II with local search for a multi-objective reactive power compensation problem. Electrical Power and Energy Systems. 2012.

POMBO, A. V., PINA, J. M., PIRES, V. F. Multiobjective planning of distribution networks incorporating switches and protective devices using a memetic optimization. Reliability Engineering and System Safety. 2015.

Report of a survey on the performance of shunt capacitors (1949). AIEE Transactions. Vol 68, p 1200-1207.

SALAS, C. S. S.. Alocação de Capacitores em Redes de Distribuição Primárias e Secundárias Incluindo Restrições de Ressonância. Tese de Doutorado. Unicamp, 2010.

SEBILLOTTE, E., THEOLEYRE, S., SAID, S., GOSSE, B. e GOSSE, J. P. AC degradation of impregnated polypropylene films. IEEE transactions on Electrical Insulation, Vol 27, n 3, 557-566, 1992.

SCHAFFER, J. *Multiple objective optimization with vector evaluated Genetic Algorithms*. In: *Genetic Algorithms and their Applications: Proceedings of the first International Conference on Genetic Algorithms and their Applications*, Lawrence Erlbaum, 1985, p. 93-100.

- SCHIMIDT, W. Materiais Elétricos: isolantes e magnéticos. 3ª edição. Vol 2. Blucher, 2010.
- SEGURA, S., SILVA, L. C. P. da, ROMERO, R., SALLES, D. Strategic capacitor placement in distribution systems by minimisation of harmonics amplification because of resonance. IETDL, 2012.
- SEHIEMY, R. E., ELA, A. A. E., SHAHEEN, A. Multi-objective fuzzy-based procedure for enhancing reactive power management. IET Generation, Transmission and Distribution. 2013.
- SILVA, R. D.. Análise e definição de índices de ressonância harmônica em sistemas de energia elétrica. Dissertação de Mestrado. 91 f. UFPA. Belém, 2004.
- SOUZA, B. A., ALMEIDA, A. M. F. Multiobjective Optimization and Fuzzy Logic Applied to Planning of the Volt/Var Problem in Distributions Systems. Transactions on Power Systems. IEEE, 2010.
- TEIXEIRA, D. A.. Análise das distorções harmônicas: estudo de caso de um sistema industrial. Dissertação de Mestrado. 128 f. PPGEE-UFMG. Belo Horizonte, 2009.
- TICONA, W. G. C.; DELBÉM, A. C. B.. Algoritmos evolutivos para otimização multi-objetivo Algoritmos de Estimção de Distribuição e Aplicações. Cód. SCE5876. São Carlos, 2008.
- VIDMAR, R. J.. Strategic capacitor placement in distribution systems by minimisation of harmonics amplification because of resonance. IET Gener. Transm. Distrib. 2012, Vol. 6, Iss. 7, pp. 646 –656. February 2012.
- XU, W., LIU, X. e LIU, Y. Assessment of harmonic resonance potential for shunt capacitor applications. Electric Power Systems Research, p 97-104. 2001.
- YU, Xinjie; GEN, Mitsuo. Introduction to Evolutionary Algorithms. Springer, 2010.

# APÊNDICE A – DADOS E RESULTADOS DO SISTEMA 34

## BARRAS

**Tabela A. 1: Valores das Resistências, reatâncias e relação R/X**

De / para		r(pu)	x(pu)	Relação r/x	Comprimento(km)
1	para 2	0,0967	0,0397	2,4358	
2	para 3	0,0886	0,0364	2,4341	0,6000
3	para 4	0,1359	0,0377	3,6048	0,5500
4	para 5	0,1236	0,0343	3,6035	0,5500
5	para 6	0,1236	0,0343	3,6035	0,5000
6	para 7	0,2598	0,0446	5,8251	0,5000
7	para 8	0,1732	0,0298	5,8121	0,6000
8	para 9	0,2598	0,0446	5,8251	0,4000
9	para 10	0,1732	0,0298	5,8121	0,6000
10	para 11	0,1083	0,0186	5,8226	0,4000
11	para 12	0,0866	0,0149	5,8121	0,2500
12	para 13	0,1299	0,0223	5,8251	0,2000
13	para 14	0,1732	0,0298	5,8121	0,3000
14	para 15	0,0866	0,0149	5,8121	0,4000
15	para 16	0,0433	0,0074	5,8514	0,2000
16	para 17	0,1483	0,0412	3,5995	0,1000
17	para 18	0,1359	0,0377	3,6048	0,6000
18	para 19	0,1718	0,0391	4,3939	0,5500
19	para 20	0,1562	0,0355	4,4000	0,5500
20	para 21	0,1562	0,0355	4,4000	0,5000
21	para 22	0,2165	0,0372	5,8199	0,5000
22	para 23	0,2165	0,0372	5,8199	0,5000
23	para 24	0,2598	0,0446	5,8251	0,5000
24	para 25	0,1732	0,0298	5,8121	0,4000
25	para 26	0,1083	0,0186	5,8226	0,2500
26	para 27	0,0866	0,0149	5,8121	0,2000
27	para 28	0,1299	0,0223	5,8251	0,3000
28	para 29	0,1299	0,0223	5,8251	0,3000
29	para 30	0,1299	0,0223	5,8251	0,3000
30	para 31	0,1299	0,0223	5,8251	0,3000
31	para 32	0,1732	0,0298	5,8121	0,4000
32	para 33	0,1299	0,0223	5,8251	0,3000
33	para 34	0,0866	0,0149	5,8121	0,2000

**Tabela A. 2: Potências Ativas e reativas de cada barra**

Barra	P(kW)	Q(kVAr)
1	0	0
2	230	142,5
3	0	0
4	230	142,5
5	230	142,5
6	0	0
7	0	0
8	230	142,5
9	230	142,5
10	0	0
11	230	142,5
12	137	84
13	72	45
14	72	45
15	72	45
16	13,5	7,5
17	230	142,5
18	230	142,5
19	230	142,5
20	230	142,5
21	230	142,5
22	230	142,5
23	230	142,5
24	230	142,5
25	230	142,5
26	230	142,5
27	137	85
28	75	48
29	75	48
30	75	48
31	57	37,5
32	57	37,5
33	57	37,5
34	57	37,5

**Tabela A. 3: Resultados pelo MATLAB**

Barra	MATLAB®		ERRO	
	Tensão(pu)	Ângulo(°)	Tensão(%)	Ângulo(%)
1	1,0000	0	0,00	0,00
2	0,9943	-0,05	-0,02	0,00
3	0,9894	-0,1	-0,03	0,00
4	0,9827	-0,21	-0,05	4,55
5	0,9769	-0,31	-0,07	3,13
6	0,9715	-0,41	-0,08	0,00
7	0,9678	-0,5	-0,11	0,00
8	0,9657	-0,55	-0,12	1,79
9	0,9633	-0,61	-0,13	1,61
10	0,9621	-0,64	-0,14	1,54
11	0,9616	-0,65	-0,13	1,52
12	0,9615	-0,65	-0,14	1,52
13	0,9891	-0,11	-0,03	0,00
14	0,9889	-0,11	-0,03	8,33
15	0,9888	-0,12	-0,03	0,00
16	0,9888	-0,12	-0,03	0,00
17	0,9672	-0,48	-0,09	2,04
18	0,9637	-0,54	-0,10	1,82
19	0,9598	-0,62	0,11	1,59
20	0,9566	-0,68	-0,11	2,86
21	0,9539	-0,74	-0,12	2,63
22	0,9507	-0,82	-0,13	2,38
23	0,9482	-0,88	-0,14	2,22
24	0,9457	-0,94	-0,14	2,08
25	0,9446	-0,97	-0,14	2,02
26	0,9441	-0,98	-0,14	2,97
27	0,9440	-0,99	-0,14	1,98
28	0,9674	-0,51	-0,11	0,00
29	0,9672	-0,51	-0,11	1,92
30	0,9671	-0,51	-0,12	0,92
31	0,9618	-0,65	-0,13	0,00
32	0,9614	-0,66	-0,14	0,00
33	0,9613	-0,67	-0,14	0,00
34	0,9612	-0,67	-0,14	0,00

## APÊNDICE B – Divulgação da pesquisa

No decorrer do curso de mestrado foram realizadas as seguintes publicações:

Lima, A. S., de Souza, J. H. D., Kataoka, V. S., Mendes, D. C., Vieira, J. P. A., Bezerra, U.H., Tostes, M. E. L., “Uso do NSGA II no Problema de Alocação e Dimensionamento Ótimo de Banco de Capacitores Considerando a Presença de Cargas Não Lineares”. Aceito em: Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, São José dos Campos – SP, 2015.

Kataoka, V. S., Lima, A. S., de Souza, J. H. D., Mendes, D. C., Vieira, J. P. A., Bezerra, U. H., Tostes, M. E. L., “Alocação Ótima de Bancos de Capacitores em Redes de Distribuição Baseada no Algoritmo SPEA2 Considerando Cargas Não Lineares. Aceito em: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Natal – RN, 2016.

Manito, A., Tostes, M. E. L., Carvalho, C. C. M., Onaka, J., Lima, a. S., Soares, T. M., “Optimal Capacitor Banks Placement in Distribution Grids Using NSGA II and Harmonic Resonance Chart”. Aceito em: 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Belo Horizonte – MG, 2016.

Onaka, J., Lima, A. S., Kataoka, V. S., Bezerra, U. H., Tostes, M. E. L., Vieira, J. P. A., Carvalho, C. M., “Comparing NSGA II and SPEA2 metaheuristics in solving the problem of optimal capacitor banks placement and sizing in distribution grids considering harmonic distortion restrictions”. Aceito em: 17<sup>th</sup> International Conference on Harmonics and Quality of Power, Belo Horizonte – MG, 2016.