

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
COORDENAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UFCG**

Tese de Doutorado

Otimização Multiobjetivo e Lógica *Fuzzy* aplicados ao
Planejamento Integrado de Bancos de Capacitores e
Reguladores de Tensão em Redes de Distribuição

Angelo Márcio Formiga de Almeida

Campina Grande - Paraíba - Brasil
Julho de 2009

Otimização Multiobjetivo e Lógica *Fuzzy* aplicados ao Planejamento Integrado de Bancos de Capacitores e Reguladores de Tensão em Redes de Distribuição

Tese de Doutorado apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências do programa de Doutorado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Energia

Angelo Márcio Formiga de Almeida
Orientando

Benemar Alencar de Souza, D.Sc.
Orientador

Campina Grande - Paraíba – Brasil
Julho de 2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

A447o
2009

Almeida, Angelo Márcio Formiga de.

Otimização Multiobjetivo e Lógica *Fuzzy* Aplicados ao Planejamento Integrado de Bancos de Capacitores e Reguladores de Tensão em Redes de Distribuição / Angelo Márcio Formiga de Almeida. — Campina Grande, 2009.

126f. : il.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Referências.

Orientador: Prof. Dr. Benemar Alencar de Souza.

1. Sistemas de Distribuição. 2. Otimização Multiobjetivo.
3. Lógica Fuzzy. 4. Controle de Tensão e Reativos. I. Título.

CDU – 621.316(043)

**OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO E LÓGICO FUZZY APLICADOS AO
PLANEJAMENTO INTEGRADO DE BANCOS DE CAPACITORES E
REGULADORES DE TENSÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

ÂNGELO MÁRCIO FORMIGA DE ALMEIDA

Tese Aprovada em 20.07.2009


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


ORIANE MAGELA NETO, Dr., UFMG
Componente da Banca


JOSÉ ROBERTO SANCHES MANTOVANI, Dr., UNESP
Componente da Banca


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


NÚBIA SILVA DANTAS BRITO, D.Sc., UFCG
Componente da Banca

**CAMPINA GRANDE – PB
JULHO - 2009**

Dedicatória

*À minha amada esposa Socorro, por todo o apoio, compreensão e carinho dedicados
sempre.*

Aos meus filhos Manoel e Matheus e enteados Thayná e Thyago.

À minha mãe Socorro, por ter sempre se dedicado aos meus estudos.

*À memória de meu pai, Manoel Lourenço de Almeida, que com seu amor, trabalho e
dedicação, proporcionou todas as condições para que eu chegasse até aqui.*

DEDICO.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, acima de tudo, pelo dom da vida e condições para estudar e trabalhar.

À Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFCG (COPELE) pela oportunidade e apoio financeiro em poder realizar este trabalho.

Ao meu Orientador, Prof. Benemar Alencar de Souza, incentivador e amigo em todos os momentos.

Aos demais professores e funcionários do Laboratório de Alta Tensão.

Aos funcionários da Miniblibio e COPELE, Angela, Suênia e Pedro.

Aos colegas de pesquisa: Franklin, Helon, Luciano, Kleber, Karcius e José Antônio; pela amizade e convivência.

Aos colegas de trabalho do CEFET-AL: Jean Jackes, José Arnóbio e Carlos Guedes, pelo apoio recebido quando lá estive.

Aos colegas de sala: Nelson, Wilker, Célio, Ferdinando, Eubis e Michele; pela amizade e convivência.

Ao professor Cícero Nicácio, diretor do CEFET-PB, pelo apoio recebido quando vim trabalhar nesta cidade.

Aos meus estimados irmãos: Arnoud, Aldo e Adriana, por todo incentivo e apoio recebidos.

E aos demais que mesmo indiretamente participaram da realização deste trabalho, digo sinceramente,

Muito obrigado.

Sumário

Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	x
Resumo	xi
Abstract	xii
Capítulo 1 – Introdução	01
1.1 Considerações Iniciais.....	01
1.2 Objetivos e Contribuições.....	02
1.3 Trabalhos Realizados.....	04
1.4 Organização da Tese.....	06
Capítulo 2 – O Problema volt/var: Definições e Revisão Bibliográfica	08
2.1 Perdas em Sistemas de Distribuição.....	08
2.2 Controle de Tensão em Sistemas de Distribuição	11
2.3 Revisão Bibliográfica.....	14
2.3.1 Capacitores.....	14
2.3.2 Reguladores de Tensão.....	16
2.3.3 Controle Integrado (volt/var).....	18
2.3.4 Otimização Multiobjetivo.....	22
2.3.5 Lógica <i>Fuzzy</i>	23
Capítulo 3 – Otimização Multiobjetivo e Lógica <i>Fuzzy</i>	25
3.1 O Problema de Otimização Multiobjetivo.....	26
3.2 Classificação dos Métodos de Otimização Multiobjetivo.....	29
3.2.1 Métodos <i>a-priori</i>	29

3.2.2 Métodos <i>a-posteriori</i>	30
3.2.3 Métodos iterativos.....	30
3.3 Métodos Clássicos de Otimização Multiobjetivo.....	30
3.3.1 Método da Soma Ponderada.....	31
3.3.2 Método ϵ -restrito.....	33
3.4 Metas em Otimização Multiobjetivo.....	34
3.5 Lógica <i>Fuzzy</i>	35
3.5.1 Conjuntos <i>Fuzzy</i>	36
3.5.2 Variáveis Lingüísticas.....	37
3.5.3 Intersecção e União de Conjuntos <i>Fuzzy</i>	38
3.5.4 Descrição de um Sistema <i>Fuzzy</i>	39
Capítulo 4 – Algoritmos Genéticos para Otimização Multiobjetivo.....	43
4.1 Técnicas de Seleção e Cálculo da <i>Fitness</i>	44
4.2 Algoritmos Genéticos Multiobjetivos da Literatura.....	47
4.2.1 VEGA.....	47
4.2.2 MOGA.....	48
4.2.3 NPGA.....	48
4.2.4 NSGA.....	49
4.2.5 SPEA.....	50
4.2.6 NSGA-II.....	51
4.2.7 SPEA2.....	53
Capítulo 5 – A Formulação do Problema.....	58
5.1 Formulação Geral.....	59
5.2 Critérios para a Localização Ótima.....	59

5.3 Redução do Espaço de Busca.....	61
5.3.1 Reguladores de Tensão.....	61
5.3.2 Capacitores (análise de sensibilidade).....	66
5.4 Codificação.....	72
5.5 Funções Objetivo.....	77
5.5.1 Função Objetivo de Capacitores.....	77
5.5.2 Função Objetivo de Reguladores de Tensão.....	79
5.6 Formulação para Otimização Multiobjetivo.....	81
5.7 Algoritmo Proposto.....	82
Capítulo 6 – Estudos de Casos e Análises de Resultados.....	84
6.1 Condições Iniciais e Parâmetros de Entrada.....	84
6.2 Resultados Preliminares.....	86
6.2.1 Alimentador 01: 69 Barras.....	86
6.2.2 Alimentador 02: 167 Barras.....	89
6.3 Análise de Sensibilidade para Capacitores.....	92
6.4 Análise Individual.....	94
6.4.1 Apenas Capacitores.....	94
6.4.2 Apenas Reguladores de Tensão.....	96
6.5 A Escolha do Decisor.....	99
Capítulo 7 – Conclusões.....	101
Referências Bibliográficas.....	105
Apêndice A – Dados do Sistema Real Utilizado para Aplicação.....	116
Apêndice B – O Modelo do Capacitor.....	119
Apêndice C – Bancos de Reguladores de Tensão: Delta Fechado e Delta Aberto.....	121

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Diagramas Fasoriais p/ um alimentador com Fator de Potência atrasado.....	10
Figura 2.2 – Esquema de SE c/ controle de tensão feito via OLTC.....	12
Figura 3.1 – Conjunto de soluções, espaço objetivo e grau de dominância em um problema de minimização com dois objetivos.....	27
Figura 3.2 – Representação gráfica do conceito de dominância de Pareto em um problema de minimização com dois objetivos.....	28
Figura 3.3 – Interpretação gráfica do método da soma ponderada.....	33
Figura 3.4 – Interpretação gráfica do método ϵ -restrito.....	34
Figura 3.5 – Funções de pertinência para a variável temperatura.....	38
Figura 3.6 – Esquema simplificado de um sistema <i>fuzzy</i>	40
Figura 4.1 – Conjunto de soluções em um problema de minimização com dois objetivos	54
Figura 4.2 – Algoritmo de corte do SPEA2 em um problema de minimização com dois objetivos.....	56
Figura 5.1 – Funções de pertinência para a variável de entrada: tensão de barra.....	63
Figura 5.2 – Funções de pertinência para a variável de entrada: potência do regulador.....	64
Figura 5.3 – Funções de pertinência para a variável: índice de saída.....	65
Figura 5.4 – Gráfico de superfície das variáveis após a <i>deffuzificação</i>	66
Figura 5.5 – Funções de pertinência para a variável de entrada: redução de perdas de energia.....	69
Figura 5.6 – Funções de pertinência para a variável de entrada: fator de potência.....	70

Figura 5.7 – Funções de pertinência para a variável de entrada: tensão de barra	70
Figura 5.8 – Funções de pertinência para a variável: índice de saída.....	72
Figura 5.9 – Estrutura do cromossomo decodificado.....	73
Figura 5.10 – Estrutura do cromossomo decodificado para dois reguladores de tensão.....	73
Figura 5.11 – Função de pertinência <i>fuzzy</i> que compõe a função objetivo de reguladores.....	80
Figura 5.12 – Esquema simplificado do algoritmo proposto.....	83
Figura 6.1 – Alimentador radial de 69 barras (Baran & Wu, 1989).....	87
Figura 6.2 – Cromossomo presente no arquivo após a convergência do SPEA2 (Alimentador 01).....	87
Figura 6.3 – Perfis de tensão do tronco para a condição de carga de pico (Alimentador 01).....	88
Figura 6.4 – Soluções no espaço objetivo para o controle integrado (volt/var) do alimentador 01: aproximação da fronteira de Pareto.....	88
Figura 6.5 – Cromossomo p/ 02 reguladores, presente no arquivo após a convergência do SPEA2 (Alimentador 02).....	90
Figura 6.6 – Perfis de tensão do tronco para a condição de carga de pico (Alimentador 02).....	90
Figura 6.7 – Soluções no espaço objetivo para o controle integrado (volt/var) do alimentador 02: aproximação da fronteira de Pareto.....	91
Figura 6.8 – Cromossomo presente no arquivo após a convergência do SPEA2 considerando apenas alocação de capacitores (Alimentador 02).....	94
Figura 6.9 – Perfis de tensão do tronco p/ a condição de carga de pico (Alimentador 02) considerando apenas alocação de capacitores.....	95

Figura 6.10 – Soluções no espaço objetivo para o controle integrado (volt/var) do alimentador 02, considerando apenas a alocação de capacitores.....	96
Figura 6.11 – Cromossomo presente no arquivo após a convergência do SPEA2 considerando apenas alocação de reguladores de tensão (Alimentador 02)....	97
Figura 6.12 – Perfis de tensão do tronco para a condição de carga de pico (Alimentador 02) considerando apenas alocação de reguladores de tensão.....	98
Figura 6.13 – Soluções no espaço objetivo para o controle integrado (volt/var) do alimentador 02, considerando apenas a alocação de reguladores de tensão....	99
Figura C.1 – Banco de reguladores monofásicos ligados em delta fechado	122
Figura C.2 – Banco de reguladores monofásicos ligados em delta aberto.....	124

Lista de Tabelas

Tabela 5.1 - Escolha do tipo de capacitor a ser alocado na barra candidata.....	74
Tabela 5.2 - Colocação de capacitores nas barras.....	75
Tabela 6.1 - Perdas anuais de energia antes dos equipamentos instalados.....	85
Tabela 6.2 – Parâmetros do SPEA2.....	85
Tabela 6.3 - Fatores de carregamento e duração anual dos patamares de carga (Baran & Wu, 1989).....	86
Tabela 6.4 - Fatores de carregamento e duração anual dos patamares (CZA03-CEAL).....	89
Tabela 6.5 - Perdas anuais de energia para uma das soluções <i>não-dominadas</i> apresentadas no arquivo.....	91
Tabela 6.6 - Decodificação do cromossomo – Somente capacitores.....	95
Tabela 6.7 - Perdas anuais de energia e Fator de Potência total para uma das soluções <i>não-dominadas</i> presentes no arquivo (somente capacitores).....	95
Tabela 6.8 - Perdas anuais de energia e Fator de Potência total para uma das soluções <i>não-dominadas</i> presentes no arquivo (somente reguladores de tensão).....	98
Tabela A.1 – Dados do alimentador CZA03 da CEAL.....	117
Tabela C.1 – Dados de Reguladores de Tensão Monofásicos.....	126

Resumo

Esta tese trata do controle integrado de tensão e reativos (volt/var) em alimentadores de distribuição, no âmbito de planejamento, através da inserção de bancos de reguladores de tensão e de capacitores. Um algoritmo genético multiobjetivo incrementado por lógica *fuzzy* é apresentado para resolver o problema volt/var, uma vez que este se constitui um problema de otimização combinatória multiobjetivo. O conhecimento especialista é aplicado através da lógica *fuzzy* para promover uma redução do espaço de busca, utilizando reguladores em unidades padronizadas, bem como avaliando a sensibilidade das barras para receberem capacitores.

Os objetivos da resolução do problema volt/var são para minimizar: desvio de tensão de barra e custo total das perdas. Segundo os preceitos da otimização multiobjetivo, um conjunto de soluções ótimas é obtido, o qual representa a solução de todos os objetivos, concomitantemente, onde são respeitadas as restrições operacionais do sistema. O algoritmo é aplicado a um alimentador de 69 barras, conhecido da literatura e depois a um alimentador real de 167 barras. Os resultados mostram uma boa aproximação da fronteira de Pareto no conjunto de soluções e que houve correção do perfil de tensão aliada a uma significativa redução nas perdas.

Abstract

This thesis deals with integrated voltage and reactive power control (volt/var) for radial distribution feeders in planning issues, by means of the application of automatic voltage regulators (AVRs) banks and capacitors. A multiobjective genetic algorithm (SPEA2) improved using fuzzy logic is presented to solve the volt/var problem, since it is a combinatorial multiobjective optimization problem. The expert knowledge is taken into account via fuzzy logic in order to reduce the search space using voltage regulators in standard units as well doing capacitors sensitivity analysis. According to the multiobjective optimization fundamentals, an optimal solution ensemble is obtained, which concomitantly represents the solutions to both objectives, in such a way that the operational constraints of systems are satisfied. The algorithm is evaluated for a known 69-bus feeder in the literature of the subject and to 167-bus real feeder. The obtained results demonstrate that the proposed method provides good concordance between the obtained solution and the Pareto front, correction of voltage profile jointly with losses reduction.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações Iniciais

O crescimento dos sistemas de distribuição, tanto em sua extensão quanto na própria carga instalada, tem alterado a maneira como se planeja e opera a rede. A competitividade do mercado e a exigência pela melhoria nos índices de qualidade de energia, fazem com que os trabalhos atuais sejam cada vez mais direcionados para: redução das perdas, correção de fator de potência e o controle do perfil da tensão.

Essa nova realidade exige que as ferramentas de simulação dos sistemas se adaptem ao novo contexto e sendo assim, rotinas de otimização para resolver problemas de planejamento ou operação da distribuição devem observar características físicas e operacionais das redes de distribuição. Vários procedimentos de engenharia de distribuição, tais como: planejamento e reconfiguração de redes, estimação de estado, localização ótima de capacitores fixos e chaveados, bem como a localização e ajustes ótimos de reguladores de tensão, podem ser vistos como problemas de otimização combinatória.

O problema do controle integrado de tensão e reativos (volt/var) é bem característico para ser resolvido utilizando métodos de otimização multiobjetivo, tratando os objetivos: controle de tensão nas barras do alimentador e controle de reativos (redução de perdas), através da localização e ajustes de bancos de reguladores de tensão e de capacitores. O problema é de otimização combinatória multiobjetivo, em que se considera a característica discreta do problema (barras de instalação dos bancos e degraus de operação para os reguladores).

O fluxo de carga calculado na rotina de otimização utiliza o método da soma de potências, Das et al (1995), tendo em vista a robustez, rapidez e garantia de convergência, mesmo para alimentadores extensos e carregados. Nessas condições, métodos baseados em matrizes como Gauss-Sidel e Newton Raphson, podem não convergir.

É dentro do contexto de qualidade da energia elétrica, no que se refere principalmente a manter sempre os níveis de tensão entregues ao consumidor dentro dos limites aceitáveis e também na temática de redução de perdas em sistemas de distribuição, que se insere este trabalho.

1.2 Objetivos e Contribuições

Desenvolver um algoritmo de otimização híbrido que consiste de um algoritmo genético multiobjetivo orientado por lógica *fuzzy*, para resolver concomitantemente, no âmbito de planejamento, o problema de controle de tensão e reativos (volt/var) em redes de distribuição. Para isso, a rotina deve fornecer como resultado a localização e programação de bancos de capacitores fixos e chaveados em unidades padronizadas, bem como a localização, ajustes e dimensionamento das unidades

de reguladores de tensão. O algoritmo deve considerar a natureza discreta do problema que se constitui como um problema de otimização combinatória multiobjetivo.

O algoritmo híbrido proposto foi implementado de modo que a entrada dependa apenas de dados acessíveis ao planejador. Na saída é obtido um conjunto de soluções (aproximação da “fronteira de Pareto”) exequíveis, visto que são consideradas unidades padronizadas para os equipamentos, bem como restrições de natureza prática, advindas do conhecimento especialista, aplicadas através da lógica *fuzzy* e no processo de codificação. Os objetivos foram alcançados mediante os seguintes procedimentos:

- Aplicação da lógica *fuzzy* para a redução do espaço de busca para a instalação dos bancos de reguladores de tensão. Nesta etapa são considerados os valores padronizados de potência (kVA) de reguladores fabricados. Como resultado foi obtido um conjunto reduzido de barras candidatas onde já era determinada, para cada barra candidata, a potência do regulador de tensão caso fosse ali instalado;
- Concepção de uma estrutura cromossômica binária de alta eficiência, de modo a não se ter o problema da ocorrência de cromossomos defeituosos. Feito isto, não houve perda de tempo em calcular soluções infactíveis para problema volt/var. Na estrutura cromossômica foi considerada a utilização de curva de duração de carga segmentada em três patamares;
- Utilização adequada de modelos para o banco de reguladores, capacitor, alimentador e carga, bem como de alimentadores reais de distribuição;
- Observância de restrições práticas como: custos, número máximo de módulos alocados, restrições de locais por motivos técnicos, urbanísticos ou de segurança;

As contribuições deste trabalho para o estado da arte foram essencialmente a obtenção de um conjunto de soluções ótimas para o problema volt/var, de forma eficiente

e confiável, segundo preceitos das modernas técnicas de otimização multiobjetivo, sendo incrementado por lógica *fuzzy* através da composição de regras com valiosas informações do conhecimento especialista a respeito do problema.

1.3 Trabalhos Realizados

Apresentam-se a seguir, um resumo, em ordem cronológica, dos trabalhos realizados para o desenvolvimento da pesquisa apresentada nesta tese:

- Revisão bibliográfica de algoritmos genéticos (AG), capacitores, reguladores de tensão e do problema volt/var para redes de distribuição;
- Desenvolvimento de um AG para obtenção da solução ótima de cada problema em separado: primeiro para reguladores de tensão e em seguida, para capacitores. Nesta etapa foram feitos os refinamentos e ajustes de cada uma das funções objetivo;
- Desenvolvimento de uma técnica alternativa para tratar o problema multiobjetivo volt/var: alocação de bancos de capacitores e reguladores de tensão. Foram utilizados dois AG, na forma canônica, para emular um algoritmo multiobjetivo. Além de tratar de compensação reativa, foi proposta uma mudança na função de aptidão do algoritmo genético de reguladores de tensão;
- Revisão bibliográfica de métodos de otimização multiobjetivo;
- Implementação do algoritmo multiobjetivo SPEA2 (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*) para resolver o problema do controle integrado de tensão e reativos (volt/var), através da aplicação simultânea de bancos de capacitores e reguladores de tensão em um alimentador de distribuição de 62 barras;

- Revisão bibliográfica de lógica *fuzzy*, em particular de trabalhos publicados para resolver problemas de redes de distribuição de energia elétrica;
- Desenvolvimento do algoritmo híbrido utilizando lógica *fuzzy* e o método de otimização multiobjetivo (SPEA2);
- Desenvolvimento da redução do espaço de busca, utilizando lógica *fuzzy*, para alocação de capacitores;
- Aplicação do método desenvolvido para um alimentador conhecido da literatura e para um alimentador real de 167 barras.

Os trabalhos realizados nestas etapas resultaram nas seguintes publicações:

Evento	Título	Autores
IEEE/PES T&D Latin America 2004, São Paulo/SP, 08-11 de novembro de 2004.	Localização e Ajustes Ótimos de Bancos de Reguladores Automáticos em Redes de Distribuição Utilizando Algoritmos Genéticos	Benemar Alencar de Souza Angelo M.F. de Almeida Helton do Nascimento Alves
CIREN - 18th International Conference on Electricity Distribution, Turin, 6-9 June 2005.	Optimal Localization Of Voltage Regulator Banks In Distribution Systems Based On Technical And Economic Criteria	Angelo M.F. de Almeida Benemar Alencar de Souza Franklin M.P. Pamplona Helon David M.Braz
VI SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica. Belém/PA, 21-24 de agosto de 2005.	Controle Integrado do Perfil de Tensão e de Distorções Harmônicas em Alimentadores Radiais de Distribuição com Aplicação Simultânea de Reguladores de Tensão e Filtros Harmônicos Passivos	Angelo M.F. de Almeida Franklin M.P. Pamplona Helon David M.Braz Benemar Alencar de Souza
VII CBQEE – Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica. Santos/SP, 05-08 de agosto de 2007.	Planejamento Integrado de Bancos de Capacitores e Reguladores de Tensão em Redes de Distribuição	Angelo M.F. de Almeida Helon David M.Braz Franklin M.P. Pamplona Benemar Alencar de Souza
VIII SBAI – Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Florianópolis/SC, 08-11 de outubro de 2007.	Volt/Var Control In Distribution Systems As A Multiobjective Optimization Problem	Angelo M.F. de Almeida Benemar Alencar de Souza Helon David M.Braz Franklin M.P. Pamplona
XXIX CILAMCE – Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering. Maceió/AL, 04-07 November 2008.	Genetic Algorithm and Fuzzy Logic Applied to Planning of Voltage Regulators in Distribution Systems.	Angelo M.F. de Almeida Benemar Alencar de Souza Helon David M.Braz Franklin M.P. Pamplona
VII CBQEE – Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica. Blumenau/SC, 02-05 de agosto de 2009.	Planejamento de Reguladores de Tensão em Redes de Distribuição via Algoritmos Genéticos e Lógica <i>Fuzzy</i>	Angelo M.F. de Almeida Benemar Alencar de Souza Helon David M.Braz Franklin M.P. Pamplona
IEEE Transactions on Power Systems Submetido em Abril de 2009	Multiobjective Optimization and Fuzzy Logic Applied to Planning of volt/var problem in Distribution Systems.	Benemar Alencar de Souza Angelo M.F. de Almeida

1.4 Organização da Tese

Este trabalho encontra-se dividido em 07 (sete) capítulos. Segue uma breve descrição do conteúdo dos capítulos seguintes.

No capítulo 2 é feita inicialmente uma abordagem do problema volt/var, tratando da aplicação de reguladores de tensão e capacitores em redes de distribuição. Em seguida, faz-se a revisão bibliográfica tanto do problema a ser resolvido como das ferramentas utilizadas. A verificação do estado da arte é feita para alocação de capacitores em redes de distribuição. Depois, a alocação de reguladores de tensão e em seguida os tipos de controle volt/var, tanto no âmbito da operação quanto do planejamento, métodos de otimização multiobjetivo e lógica *fuzzy* aplicadas aos sistemas de distribuição de energia elétrica.

No Capítulo 3 são feitas: a definição e classificação de um problema de otimização multiobjetivo onde também é abordado o conceito de *dominância* de soluções em problemas deste tipo. Em seguida, são tratados os métodos clássicos de otimização multiobjetivo. O conceito, classificação e formulação matemática da lógica *fuzzy* completam este capítulo.

No Capítulo 4 são tratados os Algoritmos Genéticos Multiobjetivos (AGMO). Primeiro trata, em detalhe, das técnicas de seleção, cálculos de *fitness* e diversidade de soluções. Em seguida são tratados os mais importantes AGMO da literatura, incluindo o método utilizado neste trabalho, o SPEA2 (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*).

O capítulo 5 trata da formulação do problema. É feito o detalhamento das considerações adotadas para cada objetivo em particular, definição das funções objetivo e da codificação adotada. A redução do espaço de busca para reguladores de tensão e em seguida para capacitores tem o detalhamento feito neste capítulo.

No capítulo 6 é feito o estudo de caso e análise de resultados para um alimentador de 69 barras, conhecido da literatura e depois para um alimentador real de 167 barras do sistema de distribuição da CEAL - Companhia Energética de Alagoas. Foram utilizadas medições do alimentador para obter a curva de carga segmentada em três patamares. Também é apresentada uma análise quando se considera individualmente a alocação de capacitores e depois de reguladores de tensão para o problema volt/var.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões desta Tese, nos quais se procurou resumir as contribuições e limitações deste trabalho, bem como apontar possíveis pontos para pesquisas futuras. No Apêndice A, encontram-se os dados do alimentador utilizado. No Apêndice B, trata-se da formulação do capacitor como impedância constante e no Apêndice C, são apresentados: o modelamento e formulação matemática de bancos de reguladores de tensão em delta aberto e delta fechado. Os resultados deste trabalho foram publicados em Almeida et al (2007b) e submetidos ao periódico *IEEE Transactions on Power Systems*.

Capítulo 2

O Problema volt/var: Definições e Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentadas as definições inerentes ao problema do controle integrado de tensão e reativos em redes de distribuição de energia elétrica, também conhecido como problema volt/var. Em seguida é apresentada a revisão bibliográfica tanto dos trabalhos relacionados ao problema volt/var como também para os trabalhos de otimização multiobjetivo e lógica *fuzzy*, aplicados em sistemas de potência.

2.1 Perdas em Sistemas de Distribuição

Na operação e planejamento da expansão de um sistema de distribuição de energia elétrica; a temática de redução de perdas para que se possa atender satisfatoriamente aos critérios econômicos como também os de qualidade de energia; devem ser considerados. Existem dois tipos de perdas em um sistema de distribuição: fixas e variáveis.

As perdas fixas são aquelas essencialmente constantes, inerentes ao funcionamento dos equipamentos que compõem o sistema. Portanto, para compensá-las, uma parte da capacidade instalada deve ser reservada. Em geral, o custo associado às perdas fixas é baixo. As perdas variáveis modificam-se de acordo com a carga, sendo mais preocupantes do que as perdas fixas. Para fins de estudo, as perdas variáveis podem ser divididas em duas: perdas de potência e perdas de energia.

As perdas de potência, especialmente nos horários de maior consumo (ditos como horários de pico), são de grande importância para o sistema de distribuição. Reduzir as perdas de potência nos horários de pico significa aliviar o sistema e permitir que novos consumidores sejam atendidos. As perdas de energia são as perdas de potência contabilizadas ao longo de um período de tempo que pode ser diário, semanal, mensal ou anual.

A diminuição das perdas de energia representa um aumento no faturamento por parte das concessionárias de distribuição, uma vez que uma parcela da energia que estava sendo perdida passa a ser efetivamente vendida. O consumidor também é beneficiado, pois com a redução das perdas de energia há uma melhoria nos níveis de tensão ao longo do alimentador de distribuição.

Uma das formas mais eficientes para redução das perdas variáveis em sistemas de distribuição é a aplicação estratégica de capacitores em derivação. Estes podem ser dispostos em módulos fixos ou chaveados. Como a carga varia ao longo do tempo, a partir do conhecimento da curva de carga e da curva de duração de carga do sistema, é possível utilizar capacitores chaveados que entram em ação automaticamente em horários pré-estabelecidos, com o objetivo de minimizar as perdas de energia.

Aplicação de Capacitores em Sistemas de Distribuição

A aplicação ótima de capacitores em derivação em sistemas de distribuição resulta na melhoria do fator de potência e, por conseguinte traz os seguintes benefícios:

- Redução das perdas de potência e perdas de energia;
- Melhoria do perfil de tensão do alimentador;
- Liberação de capacidade instalada;
- Aumento no faturamento das concessionárias.

Em geral, os bancos de capacitores são instalados em paralelo com cargas indutivas melhorando o fator de potência nos pontos onde são aplicados (Gönen, 1986).

Os capacitores compensam o atraso de fase, com relação à tensão, da componente reativa da corrente drenada pela carga. Conforme Figura 2.1, a aplicação de capacitores em derivação no sistema, reduz a amplitude da corrente fornecida à carga.

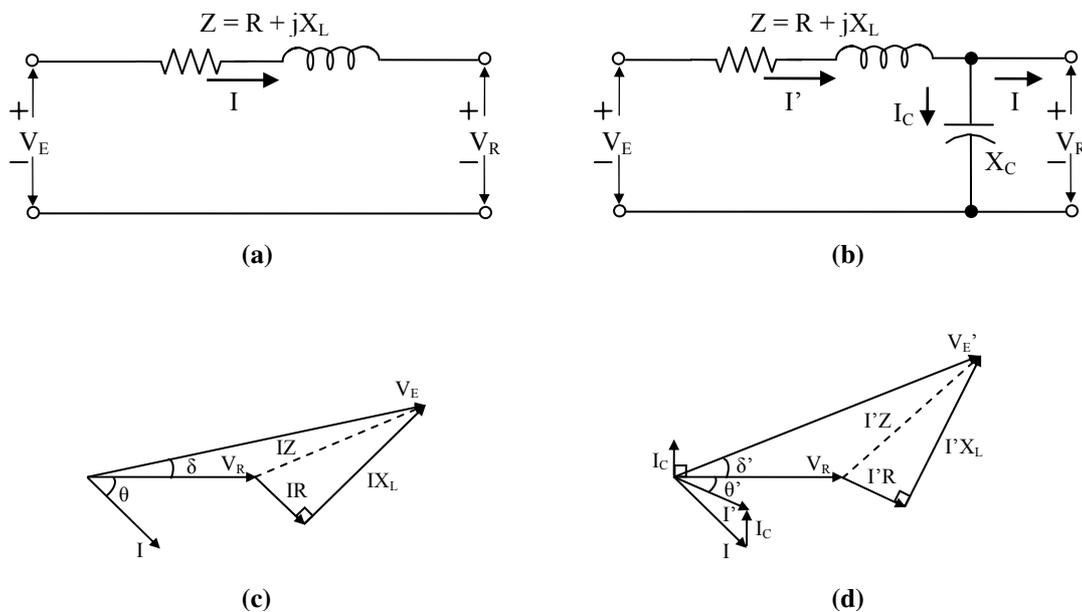


Figura 2.1 – Diagramas fasoriais para o circuito de um alimentador com fator de potência atrasado.

(a) e (c) Sem capacitores. (b) e (d) Com capacitores.

Conseqüentemente, a queda de tensão entre o terminal emissor e o terminal receptor é reduzida. Contudo, capacitores em derivação não afetam a corrente ou modificam o fator de potência nos trechos a jusante aos seus pontos de instalação.

2.2 Controle de Tensão em Sistemas de Distribuição

Para manter o perfil de tensão da rede de distribuição dentro dos limites admissíveis, algumas ações podem ser executadas (Gönen, 1986):

1. Uso de geradores distribuídos para regulação da tensão;
2. Instalação de transformadores com mudança de *tap* sob carga;
3. Banco de capacitores no barramento da subestação;
4. Balanceamento de carga nos alimentadores de média tensão;
5. Incremento na bitola dos condutores do alimentador;
6. Incremento do número de fases e divisão da carga, quando se tratar de alimentadores monofásicos ou bifásicos;
7. Transferência de carga para novos alimentadores;
8. Instalação de novas subestações e alimentadores;
9. Incremento no nível de tensão primária dos alimentadores;
10. Instalação de reguladores de tensão nos alimentadores;
11. Instalação de banco de capacitores paralelos nos alimentadores;
12. Instalação de capacitores série nos alimentadores.

A seleção de uma ou mais opções depende do sistema e da intensidade dos problemas e deve ser cuidadosamente avaliada na fase de planejamento da expansão, a fim de levar em conta uma previsão futura de crescimento e comportamento sazonal da carga,

bem como avaliação técnica-econômica de cada opção e do seu reflexo sobre o sistema (Bremerman, 2008).

Um tipo de controle bastante comum é feito na própria subestação (SE) quando se tem o transformador com recurso de mudança de *tap* sob carga, também conhecido como OLTC (*on load tap changer*).

Apresenta-se na Figura 2.2 um esquema típico deste tipo de controle de tensão. Observa-se que a variação do *tap* do transformador altera a tensão de todos os alimentadores, pois todos estão ligados ao mesmo barramento. Nesta configuração, um inconveniente pode acontecer quando se têm ligados ao barramento, alimentadores cujas curvas de carga são muito diferentes, como por exemplo, do tipo carga residencial e outro do tipo carga comercial.

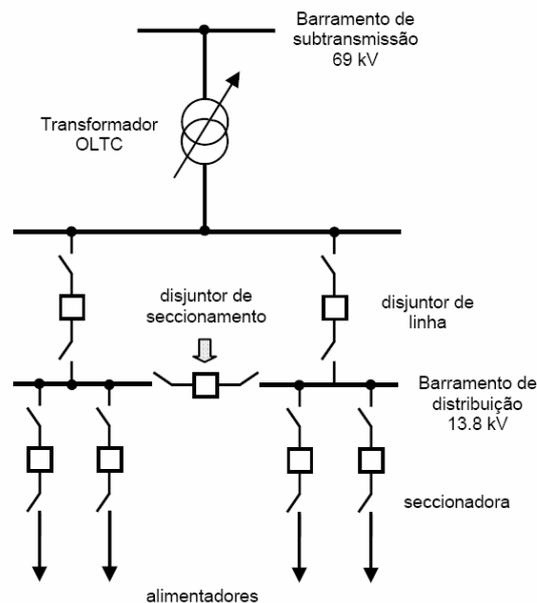


Figura 2.2 – Esquema de subestação com controle de tensão feito com transformador OLTC.

No alimentador residencial, o horário de carga de pico normalmente inicia às 18:00 h. No alimentador comercial é a partir deste horário em que a carga começa a ser retirada. Portanto, é difícil atender aos dois alimentadores simultaneamente; quando estes estão ligados ao mesmo barramento e submetidos ao mesmo controle de tensão.

Outro problema que pode ocorrer é a violação do limite superior de tensão para os consumidores localizados próximos à subestação. Uma alternativa viável é a utilização de bancos de reguladores automáticos de tensão. Desta forma, pode-se ter o controle de tensão para cada alimentador de forma independente. Além disso, se forem localizados corretamente, é possível um controle mais eficaz para não haver violações dos limites de tensão permitida ao consumidor. Essa alternativa pode ser mais vantajosa em relação aos custos de aquisição e de manutenção, sendo utilizada neste trabalho.

Aplicação de Reguladores Automáticos de Tensão

A partir do conhecimento da curva de carga ou da curva de duração de carga segmentada do sistema, é possível utilizar reguladores automáticos de tensão que mudam os degraus de operação. O objetivo principal é corrigir o perfil de tensão da rede, o que também colabora na redução das perdas quando o tipo predominante de carga é de potência constante. Isto ocorre normalmente em alimentadores radiais urbanos (Rahardjo, 2003).

A localização dos reguladores usualmente é feita na barra imediatamente anterior à barra que se encontra com tensão abaixo do limite inferior permitido, na condição de carga de pico e já se prevendo um horizonte de crescimento de carga. O número de reguladores instalados depende do perfil de tensão original e do carregamento do alimentador. Normalmente são utilizados até dois reguladores em série quando um único não for suficiente. As opções para o tipo e configuração são: reguladores trifásicos em estrela aterrado ou banco de reguladores monofásicos em delta fechado e delta aberto.

O uso de bancos de reguladores monofásicos em delta fechado é o mais viável, pois tem maior faixa de regulação (%) de tensão e uma maior flexibilidade na operação. Isso porque pode operar em delta aberto quando uma unidade sair de operação por falha ou por programação de manutenção.

Apresentam-se no Apêndice C os bancos de reguladores monofásicos nas configurações em delta fechado e delta aberto; suas configurações, o dimensionamento da potência e uma parte do manual de um conhecido fabricante, segundo recomendações da norma IEEE *Standard C57.15-1999*.

2.3 Revisão Bibliográfica

Nesta seção são tratados inicialmente os trabalhos de alocação de bancos de capacitores fixos e chaveados, bem como de reguladores de tensão separadamente. Em seguida, os trabalhos que tratam do controle integrado de tensão e reativos (volt/var), no âmbito da operação e também para o planejamento da expansão. Logo após, apresentam-se os trabalhos que utilizam métodos de otimização multiobjetivo e por fim os de lógica *fuzzy*, principalmente aqueles aplicados em sistemas de distribuição de energia elétrica.

2.3.1 Capacitores

A aplicação de capacitores em redes de distribuição sempre despertou interesse devido a sua importância técnica e econômica. Como resultado, tem-se um grande número de publicações sobre este tema. De acordo com Ng et al (2000a), contando todas as publicações realizadas pelos comitês do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) que tratam de controle de tensão e potência reativa, chega-se a uma lista com mais de 400 artigos, sendo que muitos destes tratam especificamente do problema da alocação ótima de capacitores.

Diversas técnicas vêm sendo propostas para realizar a alocação ótima de capacitores durante, pelo menos, as últimas cinco décadas. A evolução dos recursos computacionais permitiu a implementação de métodos cada vez mais sofisticados, os quais podem ser classificados conforme o processo de otimização utilizado.

Esses métodos são divididos em quatro categorias, tendo evoluído cronologicamente nesta ordem:

- Métodos analíticos;
- Métodos de programação matemática;
- Métodos heurísticos;
- Métodos baseados em inteligência artificial.

Antes da década de 1990, os métodos analíticos e os de programação matemática predominaram. Destes, pode-se destacar o trabalho de Baran & Wu (1989), que utilizaram o método de *programação inteira mista* e contemplaram o uso de capacitores fixos e chaveados.

A revisão apresentada aqui, tem o foco direcionado para os trabalhos que utilizam os métodos heurísticos, bem como os baseados em inteligência artificial.

Os métodos heurísticos, que são baseados em regras desenvolvidas através da intuição, experiência e julgamento, foram utilizados para alocação de capacitores nos trabalhos de Mantovani e Garcia (1995) e Cris et al (1997). Outros exemplos são: Rao et al (1996) que aplicaram a técnica do resfriamento simulado (*simulated annealing*) e Ng et al (2000b), que utilizaram lógica *fuzzy*.

O método de busca tabu foi utilizado por Huang et al (1996), que utilizaram a mesma rede de distribuição estudada por Baran & Wu (1989) no problema de compensação reativa; utilizando uma curva de duração de carga segmentada em três níveis.

Os algoritmos genéticos (AG) foram utilizados no trabalho de Das (2002) para alocação ótima de capacitores fixos e chaveados; que considerou casos distintos para o modelo do capacitor como potência constante e como impedância constante, apresentando um estado comparativo dos dois casos.

O AG proposto por Ferreira et al (2002) utiliza uma codificação para o cromossomo binário que estabelece a quantidade máxima de capacitores fixos e chaveados, sendo os chaveados para o nível de carga intermediária e carga de pico. A função de aptidão informa a economia líquida proveniente da alocação dos capacitores. Uma outra abordagem para o problema da compensação reativa foi apresentada por Souza et al (2004c), introduzindo *lógica fuzzy* e algoritmos *microgenéticos*.

Um AG também foi utilizado por Santos et al (2004); sendo a codificação do cromossomo feita somente para a condição de carga de pico.

Milošević & Begović (2004) fizeram a alocação de capacitores fixos e chaveados, considerando o ajuste do perfil de tensão e a minimização das perdas e custos. Para isso, utilizaram um algoritmo genético multiobjetivo (NSGA - *Nondominated Sorting Genetic Algorithm*).

A aplicação de capacitores proporciona grandes vantagens como a redução de perdas e correção do Fator de Potência. A melhoria obtida no perfil de tensão é consequência da redução de perdas. Entretanto, quando um alimentador tem uma grande solicitação de potência ativa, a compensação reativa não consegue mais corrigir o perfil de tensão, sendo então necessária à utilização de reguladores de tensão.

2.3.2 Reguladores de Tensão

A literatura sobre aplicação de bancos de capacitores em redes de distribuição é vasta. No entanto, trabalhos que tratam da aplicação de reguladores de tensão são poucos.

Safigianni & Salis (2000) apresentaram um algoritmo para localização ótima de reguladores de tensão em alimentadores radiais; levando em conta os custos. O objetivo foi achar a solução mais econômica, utilizando um número mínimo de reguladores

e colocando sempre os *taps* mais elevados, ou seja, elevando o perfil de tensão o máximo possível. Portanto, não se tem margem para ajustes com o crescimento de carga. Consideraram a modelagem e tratamento analítico feitos para o alimentador e regulador de tensão apresentados em Grainger & Civanlar (1985) e Civanlar & Grainger (1985a). Os autores não consideraram a característica discreta do problema (número de barras e *taps*); nem banco de reguladores monofásicos. O ajuste do *tap* do regulador só é obtido para a condição de carga de pico.

Medeiros Jr. & Pimentel Filho (2002) resolveram o problema do controle de tensão com bancos de reguladores em alimentadores radiais pelo método do gradiente negativo, que é um método clássico de otimização não-linear. O método tem restrições práticas, visto que os ajustes do regulador (*taps*) são discretos e os pontos indicados de instalação (barras do alimentador) formam um conjunto finito; enquanto que o método do gradiente negativo exige que a função objetivo seja contínua e diferenciável.

Mendoza et al (2005) e Mendoza et al (2007) determinaram a quantidade de reguladores, suas localizações e os ajustes dos *taps*. O fluxo de carga utilizado foi o de Newton-Raphson. A principal diferença entre os trabalhos foi o método de otimização utilizado. No primeiro, o problema foi tratado como multiobjetivo, mas utilizou-se o método da soma ponderada através da agregação de pesos para cada objetivo, tornando o problema de objetivo único para ser resolvido por um algoritmo genético. No segundo, um algoritmo microgenético multiobjetivo proposto por Coello (2001) foi utilizado com a mesma finalidade.

Souza et al (2004a) resolveram o problema para um regulador trifásico, utilizando um algoritmo genético, levando em conta a característica discreta do problema e apresentando os resultados para um alimentador de 34 barras.

Em Souza et al (2004b), o mesmo problema foi tratado para um banco de reguladores monofásicos utilizando um algoritmo genético. Os resultados para dois alimentadores radiais, um de 34 barras e outro de 70 barras foram apresentados. O modelo de carga adotado foi o de potência constante.

Almeida (2004), além dos casos considerados em Souza et al (2004a e 2004b), considerou o caso de localizar dois bancos de reguladores para um alimentador de 70 barras. Uma inovação foi proposta em Almeida et al (2005a), ao considerar, no processo de otimização, uma modificação no AG utilizado, através de uma redução de espaço de busca; constituído apenas para as barras do tronco do alimentador. A potência do regulador de tensão também foi considerada no processo.

2.3.3 Controle Integrado (volt/var)

Conforme mencionado, o problema do controle integrado volt/var pode ser tratado tanto no âmbito de operação; quanto do planejamento. Na operação é freqüente o controle de tensão na SE via transformador com OLTC e bancos de capacitores na própria SE ou nos alimentadores. No planejamento, são utilizados bancos de capacitores fixos e chaveados e reguladores de tensão, de acordo com as características do alimentador.

Controle volt/var para operação

Liu et al (2000) propuseram o controle integrado de tensão e reativos, visando o despacho ótimo do sistema. Para isso, foram utilizados dois subproblemas. O controle da tensão foi feito através do melhor ajuste do *tap* do transformador da SE, também chamado de OLTC, em que foi utilizada programação dinâmica. O controle de reativos foi realizado, aplicando-se lógica *fuzzy* para o controle ótimo de bancos de capacitores chaveados na própria subestação e ao longo do alimentador.

Hu et al (2003) também fizeram o controle de tensão através de um OLTC na subestação e o controle de reativos por capacitores fixos e chaveados na subestação e no alimentador. Foi realizada a segmentação da curva de carga diária para uma curva de carga horária. O objetivo foi determinar o despacho ótimo da hora seguinte baseado nos valores da curva de carga horária da hora atual. O método de otimização utilizado foi um algoritmo genético.

Em Liu et al (2005), a compensação reativa foi feita por capacitores fixos e chaveados e o controle de tensão através de ajustes dos *taps* de transformadores de distribuição. O problema foi tratado como de otimização combinatória e resolvido com o método de busca tabu.

Canôas (2008) utilizou lógica *fuzzy* e o algoritmo *Particle Swarm* para fazer o controle de tensão e potência reativa através de capacitores e ajustes no transformador de *tap* sob carga (OLTC) da subestação.

Bremermann (2008) utilizou controladores *fuzzy* para realizar o controle volt/var em redes de distribuição com alocação de capacitores, reguladores de tensão e ajustes de *taps* dos transformadores do tipo OLTC na subestação.

Controle volt/var para planejamento

Em 1985, uma série de três artigos publicados se destaca por tratar do controle integrado de tensão e reativos. Grainger & Civanlar (1985) fizeram a modelagem do alimentador e regulador. Os autores mostraram que o problema de localização e ajustes do regulador de tensão, bem como de localização, dimensionamento e tempo de chaveamento dos bancos de capacitores podem ser tratados como dois problemas separadamente, ou seja, de forma desacoplada. Civanlar & Grainger (1985a) fizeram o tratamento analítico para os dois subproblemas, primeiro o do capacitor e depois do

regulador de tensão. Para cada caso, são tratadas: a redução das perdas de potência em horário de pico e das perdas totais de energia. Elas foram calculadas com base em expressões analíticas. Os autores consideraram um equivalente monofásico (tipo π) de um regulador trifásico e não trataram de banco de reguladores monofásicos.

Civanlar e Grainger (1985b) mostraram os resultados obtidos para um alimentador radial de 30 barras e 6 ramais, na tensão de 23 kV. A localização e ajustes dos reguladores foram feitos considerando os bancos de capacitores já instalados, sendo que para o regulador fez-se a localização e depois o ajuste do *tap*. Foi adotado o modelo de potência constante para todas as cargas do alimentador. O trabalho, entretanto, não considerou as características discretas do problema, tendo em vista que o número de barras e o número de degraus do regulador formam um conjunto finito e discreto. O primeiro regulador também foi levado a operar no degrau mais alto (caso necessite de mais de um regulador), conforme modelo de potência constante, sem margem para atuação, no caso de crescimento de carga.

Salama et al (1992) também consideraram a interdependência entre o perfil de tensão e as perdas na rede de distribuição. Utilizou-se o método de Gauss-Sidel para o cálculo do fluxo de carga e distribuição uniforme para a carga. São indicadas rotinas já prontas e o algoritmo de como estas rotinas funcionam para alocação de capacitores e reguladores de tensão.

O trabalho de Laframboise et al (1995) foi uma continuação de Salama et al (1992) e mostra a implementação, para um alimentador de 34 barras, através de um sistema especialista que utiliza métodos heurísticos para alocação e chaveamento de capacitores e também para reguladores de tensão.

Considerou-se os custos das perdas anuais de potência ativa em horário de pico, custos das perdas totais de energia e custos da aplicação dos capacitores. O trabalho não apresentou modelo de alimentador nem do regulador de tensão adotado.

Oliveira & Kagan (1998) sugeriram um método heurístico para seleção e alocação de bancos de capacitores e reguladores de tensão em redes de distribuição, considerando o modelo de corrente constante para as cargas. Kagan et al (2004) utilizaram o conceito de curvas típicas de carga para representação da carga no alimentador. Primeiro fez-se alocação de capacitores e em seguida; alocação de reguladores, partindo da condição inicial do sistema, sem equipamentos instalados. Para ambos os casos, considerou-se o custo benefício da alocação dos equipamentos. Entretanto, não se fez alocação simultânea de capacitores e reguladores de tensão.

Alves (2005) utilizou algoritmos genéticos para alocação simultânea de capacitores e reguladores de tensão em sistemas de distribuição, com a função objetivo composta dos dois objetivos para minimizar as perdas e desvios de tensão.

Carpinelli et al (2006) propuseram a solução do problema volt/var utilizando um algoritmo genético na forma canônica (original) e considerando o sistema trifásico desbalanceado, na presença de cargas lineares e não lineares. Todos esses objetivos são compostos em uma única função objetivo (*fitness*).

O mesmo procedimento de compor todos os objetivos em uma única função (*fitness*) também foi adotado por Szuvovivski (2008), que fez a alocação simultânea de bancos de capacitores e reguladores de tensão em sistemas de distribuição usando algoritmos genéticos e fluxo de potência ótimo.

Almeida et al (2005b) e Almeida et al (2007a) trataram de maneira diferenciada o problema multiobjetivo para dois objetivos; utilizando um AG para cada problema, sendo o primeiro trabalho para localização de reguladores e filtros harmônicos e

o segundo, para localização de reguladores e capacitores em redes de distribuição. Considerou-se o processo de busca iterativo em que cada iteração define uma época, sendo cada época formada pelos dois AG. Essa abordagem tende a tornar o tempo de processamento proibitivo quando se consideram mais objetivos.

A composição de vários objetivos em um só, através da atribuição de pesos torna a solução do problema dependente da escolha correta dos pesos. A maneira mais adequada de se tratar um problema dessa natureza é utilizar *algoritmos multiobjetivos*, nos quais as funções objetivos são tratadas simultaneamente e o resultado final é um conjunto de soluções “ótimas”, que satisfazem a todos os objetivos.

2.3.4 Otimização Multiobjetivo

Coello (1996) e Arroyo (2002) fizeram estudos comparativos entre os vários métodos de otimização multiobjetivo aplicados em casos clássicos como o *problema da mochila*.

Bernal-Agustín (1998) propôs a resolução do problema da configuração ótima de redes de energia elétrica utilizando algoritmos genéticos através de modificações dos operadores genéticos. Foram considerados os custos de operações de manobras e a restrição do limite mínimo de tensão. O autor apresentou resultados considerando primeiro um AG de um único objetivo e depois para um AG multiobjetivo.

Hashimoto (2004) utilizou técnicas de otimização multiobjetivo para a estimação do desempenho elétrico de redes de distribuição, em que as funções objetivo compõem uma avaliação de probabilidade de ocorrência.

Mendoza et al (2006) aplicaram otimização multiobjetivo para configuração ótima de alimentadores radiais. Foram aplicados os algoritmos NSGA (*Nondominated*

Sorting Genetic Algorithm) e SPEA (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*), sendo feito um estudo comparativo entre os dois.

Carrano et al (2006) resolveram o problema de configuração e expansão da rede, com minimização de custos de investimentos, perdas de energia, quantidade e tempo de faltas no sistema. Para isso, aplicaram o algoritmo multiobjetivo: NSGA-II.

Pereira Jr. et al (2006) e Pereira Jr. & Mantovani (2008) fizeram alocação de capacitores em redes de distribuição utilizando um algoritmo evolutivo multiobjetivo, sendo que no segundo utilizaram fluxo de carga probabilístico; considerando a incerteza das cargas e fator de potência dos transformadores de distribuição.

2.3.5 Lógica Fuzzy

Desde que foi proposta por Zadeh (1965) esta técnica tem sido bastante aplicada em diversas áreas do conhecimento para resolver problemas de controle, classificação e modelagem. Na área de sistemas de potência foi aplicada por Dhar (1979).

Uma revisão bibliográfica da modelagem e aplicação de lógica *fuzzy* em sistemas de potência no período 1994-2001 foi feita por Bansal (2003).

A partir da última década tem sido bem mais aplicada como nos trabalhos: NG et al (2000b), Souza et al (2004c), para compensação reativa e mais recentemente: Liang & Wang (2003), Miranda et al (2007), Canôas (2008) e Bremermann (2008), todos aplicados ao controle volt/var em redes de distribuição de energia.

Outras abordagens para aplicação de lógica fuzzy em sistemas de potência são apresentadas na tabela a seguir:

Assunto	Trabalho	Autores
Estabilidade	Genetic algorithm-aided design of a fuzzy logic stabilizer for a superconducting generate	Saleh & R. Bolton (2001)
Previsão de Carga	Short-term load forecasting by a neuro-fuzzy based approach	Liang & Cheng (2002)
Diagnóstico de Falhas	A fuzzy expert system for the integrated fault diagnosis	Lee et al (2000)
Restabelecimento de Energia	Enhancement of restoration service in distribution systems using a combination fuzzy-GA method	Hsiao & Chien (2000)
Fluxo de Carga Ótimo	Fuzzy second correction on complementary condition for optimal power flows	Wu (2001)
Análise de Estabilidade	Application of a novel fuzzy neural network to real-time transient stability swings prediction based on synchronized phasor measurements	Liu et al (1999)
Planejamento	A fuzzy filtering method applied to power distribution planning	Matos (1999)

Capítulo 3

Otimização Multiobjetivo e Lógica *Fuzzy*

Um problema de otimização multiobjetivo, consiste em otimizar (minimizar ou maximizar) simultaneamente um conjunto de objetivos satisfazendo um conjunto de restrições. Em otimização multiobjetivo, não existe uma única solução que otimize cada um dos objetivos, mas um conjunto de soluções eficientes no qual nenhuma solução é melhor que outra solução para todos os objetivos. O decisor é o responsável pela escolha de uma ou mais soluções eficientes que ponderem e representem bem os objetivos globais do problema.

Neste capítulo apresentam-se a formulação matemática para um problema de otimização multiobjetivo e os conceitos básicos usados neste tipo de problema. São descritos também alguns métodos clássicos e apresentados outros mais recentes, baseados em algoritmos genéticos, para obter soluções *Pareto-ótimas*. Esta preferência se deve ao fato de que os algoritmos genéticos trabalham com uma população de soluções que podem

conter informações sobre várias regiões do espaço de busca. Portanto, estes oferecem maiores possibilidades para encontrar o conjunto *Pareto-ótimo* ou uma aproximação deste.

O problema de Otimização Combinatória Multiobjetivo constitui uma classe de problemas que pode ser computacionalmente “intratável” pois, devido à sua natureza combinatória, apresenta dimensão de ordem exponencial.

3.1 O Problema de Otimização Multiobjetivo

Um problema de otimização multiobjetivo pode ser definido como (Arroyo, 2002):

Otimizar (minimizar ou maximizar) (3.1)

$$z = f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_r(x))$$

Sujeito a

$$g(x) = (g_1(x), g_2(x), \dots, g_p(x)) \leq b$$

em que,

X é o vetor que denota o espaço de decisões:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X \quad (x \text{ é o vetor decisão});$$

Z é o vetor que denota o espaço objetivo, ou seja, Z é a imagem de X :

$$Z = f(X)$$

$$z = (z_1, z_2, \dots, z_r) \in Z \quad (z \text{ é o vetor objetivo}).$$

As restrições $g(x) \leq b$, $b \in \mathbb{R}^p$ e o espaço X , determinam o conjunto das soluções factíveis: $X^* = \{x \in X : g(x) \leq b\}$. Assim, pode-se reescrever da forma:

Otimizar (minimizar ou maximizar) (3.2)

$$z = f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_r(x))$$

Sujeito a

$$x \in X^*$$

Conceito de Dominância de Pareto

Um vetor $a \in X$ é dito dominar um vetor $b \in X$ (também escrito como $a \prec b$), se e somente se:

$$\begin{aligned} \forall i \in (1, \dots, n), f_i(a) \leq f_i(b) \wedge \\ \exists j \in (1, \dots, n): f_j(a) < f_j(b) \end{aligned} \tag{3.3}$$

Em outras palavras, uma solução *domina* outra quando ela é menor ou igual (assumindo um problema de minimização) com respeito a todos os seus objetivos, e é estritamente menor com respeito à pelo menos um deles.

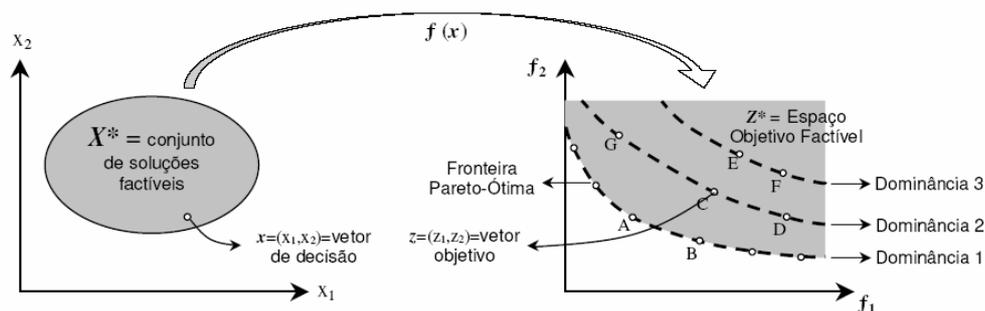


Figura 3.1 – Conjunto de soluções, espaço objetivo e grau de *dominância* em um problema de minimização com dois objetivos. Fonte: (Hashimoto, 2004).

Apresentam-se na Figura 3.1 o Espaço de Decisões e o Espaço Objetivo para um problema de minimização com dois objetivos. A imagem de X^* , que é o Espaço de Decisões Factíveis é denotada por $Z^* = \{(f_1(x), f_2(x), \dots, f_r(x)), x \in X^*\}$, denominado Espaço Objetivo factível. Dados dois vetores de decisão quaisquer $x, y \in X^*$, existem três possibilidades para os seus correspondentes vetores objetivos:

1. x *domina* y , se a imagem de x *domina* a imagem de y , isto é, $f(x) \leq f(y)$ e $f(x) \neq f(y)$;

2. y domina x , se a imagem de y domina a imagem de x , isto é, $f(y) \leq f(x)$ e $f(y) \neq f(x)$;
3. x é indiferente com y , se $f(x) \not\leq f(y)$ e $f(y) \not\leq f(x)$.

No exemplo de dois objetivos, apresentado na Figura 3.2, os vetores objetivos onde os pontos A e B *dominam* C, os pontos E e F são *dominados* por C e os pontos D e G são *indiferentes* com C. Também se diz que $x^* \in X^*$ é uma *solução eficiente* ou *pareto-ótima* se não existir outra solução $x \in X^*$ tal que x *domine* x^* . Neste caso, $z^* = f(x^*)$ é denominado *ponto eficiente* ou *ponto Pareto-ótimo*.

O conjunto de todas as soluções eficientes é denominado *conjunto eficiente* ou *conjunto Pareto-ótimo*. A imagem em Z^* do *conjunto Pareto-ótimo* é denominado *fronteira Pareto-ótima* (figura 3.2).

Em decorrência destas definições, soluções pertencentes ao *conjunto eficiente* são indiferentes entre si. Por fim, o ponto $z^0 = (z_1^0, \dots, z_r^0) \in Z^*$, tal que, $z_j^0 = \min\{f_j(x) : x \in X^*\}$. O vetor $j = (1, \dots, r)$ é chamado de *ponto ideal* ou *ponto utópico*. Este ponto não é factível na maioria dos problemas práticos (Hashimoto, 2004).

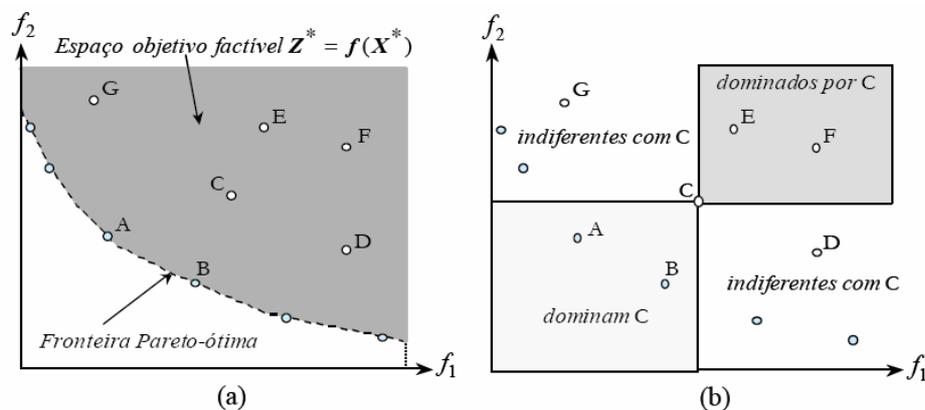


Figura 3.2 – Representação gráfica do conceito de dominância de Pareto em um problema de minimização com dois objetivos. Fonte: (Arroyo, 2002).

O desafio dos problemas de Otimização Combinatória Multiobjetivo se caracteriza em encontrar uma solução ou um conjunto de soluções factíveis, próximas da fronteira Pareto-Ótima, sem a necessidade de explorar todo o Espaço de Decisões.

A intensificação da busca deve ser devidamente avaliada pelo *projetista*, de maneira a lidar com o compromisso entre qualidade do resultado obtido e a dificuldade em melhorá-lo.

A solução dos problemas de otimização combinatória multiobjetivo consiste em determinar, no Espaço Objetivo Factível, o Conjunto Eficiente, um Subconjunto do Conjunto Eficiente ou ainda, Conjuntos de soluções próximas da Fronteira Pareto-Ótima.

3.2 Classificação de Métodos de Otimização Multiobjetivo

O tamanho e a complexidade dos métodos de solução encontrados em grande parte dos problemas práticos exigem a intervenção de um *projetista*. A partir do ponto de vista do decisor, os métodos de otimização multiobjetivo podem ser classificados em três categorias, descritos a seguir:

3.2.1 - Métodos *a-priori*

A definição dos critérios de busca pode ocorrer antes da execução da mesma, combinando os objetivos do problema em um único objetivo, segundo uma determinação de pesos de preferência do *projetista*. Como consequência, o problema acaba se constituindo na otimização de um único objetivo, que requer estratégias clássicas de otimização direta e exata.

Outra opção do *projetista* é classificar os objetivos em ordem de prioridade, efetuando a busca da solução ótima em etapas, iniciando a otimização do primeiro objetivo, sem considerar as demais e seguindo para a otimização dos objetivos seguintes,

considerando o valor ótimo anterior, até atingir o último objetivo. Esta última estratégia de método *a-priori*, utilizando decomposição, não garante a obtenção da solução eficiente (Hashimoto, 2004).

3.2.2 - Métodos *a-posteriori*

Nos denominados *métodos a-posteriori*, realiza-se primeiro a busca por soluções Pareto-ótimas, seguida do processo de decisão. Cabe ao Tomador de decisão selecionar a(s) solução(ões) que lhe convier. Em geral, esses métodos exigem um grande esforço computacional, mas confere especial interesse para os problemas de caráter investigativo, onde o *projetista* não conhece bem o Espaço Objetivo Factível.

3.2.3 - Métodos iterativos

Em alguns métodos, o *projetista* pode promover uma intervenção durante o processo de busca, efetivando eventuais redirecionamentos e guiando o esforço da busca para as regiões que julgar mais conveniente para o problema específico. Um Sistema Especialista pode ser desenvolvido nos casos onde esta intervenção seja passível de ser descrita por meio de regras.

3.3 Métodos Clássicos de Otimização Multiobjetivo

A maior dificuldade inerente aos problemas de otimização multiobjetivo é a existência de objetivos conflitantes. Isto significa que nenhuma das soluções factíveis otimiza simultaneamente todos os objetivos. As soluções ótimas para cada objetivo são, geralmente, diferentes e não satisfazem as necessidades do decisor. Este pode precisar de soluções que satisfaçam certas características com relação aos objetivos considerados.

Os métodos clássicos (Cohon, 1978) e (Steuer, 1986), encontram tais soluções escalarizando os objetivos formando apenas um. Isto implica em definir um

problema substituto, reduzindo a otimização vetorial a um problema de otimização escalar. Os problemas decorrentes são o estabelecimento sistemático de parâmetros e restrições.

3.3.1 Método da Soma Ponderada

Este método é simples e ainda empregado em otimização multiobjetivo, consistindo em transformar o problema multiobjetivo original em um problema escalar mono-objetivo. Usando pesos diferentes para cada objetivo, forma-se uma função f que é a combinação linear dos objetivos. O problema escalar resultante é:

Otimizar (maximizar ou minimizar) (3.4)

$$f(x) = \sum_{i=1}^r w_i \cdot f_i(x)$$

Sujeito a

$$x \in X^*$$

em que, $w_i \geq 0$ é o peso que representa a importância relativa do objetivo f_i . Os pesos, geralmente, são normalizados, tal que:

$$\sum_{i=1}^r w_i = 1$$

O teorema a seguir fornece condições suficientes para que uma solução do problema ponderado (3.4) seja Pareto-ótima (Chankong & Haimes, 1983):

Teorema

Dado um vetor de pesos $w = (w_1, \dots, w_r)$, uma solução $x^* \in X^*$, de (3.4), é solução Pareto-ótima se:

- a) $x^* \in X^*$ é a solução única de (3.4);

$$b) \quad w_i > 0, \forall i = 1, \dots, r .$$

A grande desvantagem desse método é que o decisor deve encarregar-se de atribuir pesos adequados aos objetivos. Para que os pesos w_i reflitam a importância relativa de cada objetivo, é preciso que as funções objetivo sejam normalizadas. Dessa forma, resolvem-se vários problemas (3.4), cada um com um vetor w distinto (positivo).

Outra desvantagem reside na limitação do método de gerar todas as soluções Pareto-ótimas quando o espaço objetivo for não convexo, conforme Figura 3.3.

Considerando os pesos w_1 e w_2 para minimizar a seguinte função:

$$y = w_1 f_1 + w_2 f_2, x \in X^* \quad (3.5)$$

Reescrevendo:

$$f_2(x) = -\frac{w_1}{w_2} \cdot f_1 + \frac{y}{w_2} f_2$$

Esta última equação define uma reta L, cuja inclinação é $-\frac{w_1}{w_2}$ e atravessa o eixo f_2 em $\frac{y}{w_2}$. Esta reta é tangente ao espaço objetivo factível Z^* em um ponto Pareto-ótimo. De forma geral, o método da soma ponderada consiste em gerar diferentes retas suportes, definidas por valores de w_1 e w_2 . Em geral, nem todos os pontos Pareto-ótimos admitem retas suportes. Observa-se na Figura 3.3 que os pontos C e D não possuem retas suportes, o que significa que estes pontos não podem ser encontrados pela minimização da função f do problema (3.4).

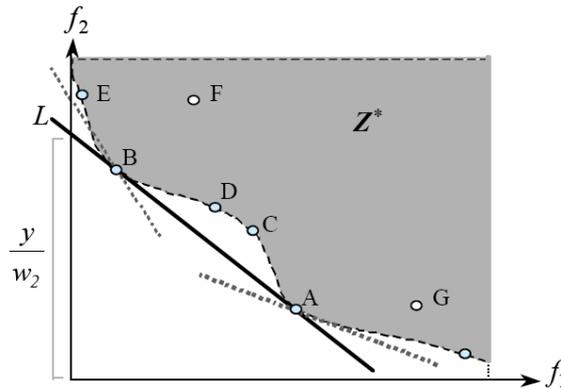


Figura 3.3 – Interpretação gráfica do método da soma ponderada. Fonte: (Arroyo, 2002).

3.3.2 Método ϵ -restrito

A idéia fundamental deste método é a minimização do objetivo de maior prioridade, sujeito à limitação dos outros objetivos. Assim, este seria o único considerado na função objetivo, conforme o seguinte problema:

$$\text{Otimizar (minimizar ou maximizar)} \tag{3.6}$$

$$f_1(x)$$

sujeito a

$$f_i(x) \leq \epsilon_i, \quad i = 2, \dots, r$$

$$x \in X^*$$

em que,

ϵ_i são os limitantes superiores dos objetivos $f_i, i = 2, \dots, r$.

Variando convenientemente os limitantes ϵ_i , é possível gerar o conjunto Pareto-ótimo, mesmo quando o espaço objetivo é não convexo. Quando o problema apresenta as funções objetivo e restrições lineares, então (3.6) é um problema de programação linear.

Um exemplo deste método para o caso de um problema com dois objetivos é apresentado na Figura 3.4. O espaço de soluções factíveis, contendo os pontos A, B, C, D e G, é limitado pela reta $\varepsilon_2 = k$. Apresenta-se também um exemplo quando ocorrem problemas com este método. Se o limitante superior não é seleccionado adequadamente ($\varepsilon_2 = k'$), o espaço de busca obtido pelas restrições pode ser vazio, o que não permite nenhuma solução factível para o problema (3.6). Para evitar esta situação, inicialmente deve-se gerar um conjunto de valores apropriados para ε_i . Cohon (1978) desenvolveu um algoritmo para obter valores adequados dos limitantes.

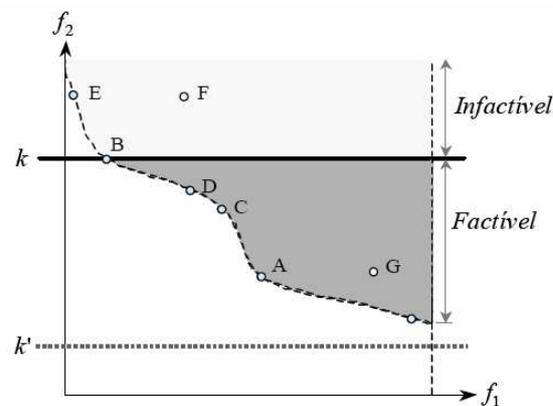


Figura 3.4 – Interpretação gráfica do método ε -restrito. Fonte: (Arroyo, 2002).

3.4 Metas em Otimização Multiobjetivo

A dificuldade em resolver problemas combinatórios multiobjetivos não é dada somente pela complexidade combinatorial, como no caso de problemas mono-objetivo, mas também pela busca de todas as soluções eficientes que crescem com o número de objetivos do problema.

Quando a informação adicional sobre importância dos objetivos é desconhecida, todas as soluções Pareto-ótimas são igualmente importantes. Duas metas importantes em Otimização Multiobjetivo (Deb et al, 2002) são:

1. Encontrar um conjunto de soluções o mais próximo possível da Fronteira de Pareto;
2. Encontrar um conjunto de soluções com a maior diversidade possível.

A finalidade da segunda meta é tão relevante quanto da primeira, pois fornece ao decisor maior alternativa de escolha para a resolução do problema, visto que é possível encontrar um conjunto ótimo de Pareto denso ou concentrado com poucas variações entre as soluções.

3.5 Lógica *Fuzzy*

Em problemas reais de planejamento, operação e controle dos sistemas de potência existem muitas incertezas e variações devido a sua dimensão e complexidade. A consequência é uma dificuldade de formular o problema através de um modelo matemático estrito.

A lógica *fuzzy* é uma técnica que se adapta bem para lidar com as imprecisões nos sistemas de potência e permite uma representação computacional dos conhecimentos heurísticos sobre determinado problema. O desenvolvimento da lógica *fuzzy* resultou da necessidade de se obter uma metodologia capaz de expressar, de maneira sistemática, quantidades imprecisas, vagas, mal definidas.

Desde que foi proposta por Zadeh (1965), esta técnica tem sido bastante aplicada em diversas áreas do conhecimento para resolver principalmente problemas de controle, classificação e modelagem. Tais problemas até então intratáveis por técnicas clássicas, tiveram êxito com a lógica *fuzzy* por ser uma ferramenta capaz de capturar informações imprecisas, descritas em linguagem natural e convertê-las em formato numérico.

3.5.1 Conjuntos Fuzzy

Na teoria de conjuntos da lógica convencional, a *pertinência de um elemento* x em um conjunto A é dada por $x \in A$.

Uma forma de se indicar essa pertinência pode ser através de uma função de pertinência $\mu_A(x)$ cujo valor indica se o elemento x pertence ou não ao conjunto A .

Assim, na lógica convencional, $\mu_A(x)$ é uma função bivalente:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (3.7)$$

Na lógica *fuzzy* um elemento pode ser membro de um conjunto parcialmente, indicado por um valor fracionário dentro de um intervalo numérico. Esta idéia básica de conjuntos *fuzzy* está fundamentada na teoria desenvolvida por L.A. Zadeh (Zadeh, 1965), que consiste na agregação da precisão inerente ao modelo matemático de conjuntos clássicos com a imprecisão do mundo real.

O “quanto” um dado elemento x pertence a um conjunto A é chamado de *grau de pertinência*, sendo representado por uma função chamada de *função de pertinência* $\mu_A(x)$. A propriedade fundamental da lógica *fuzzy* é que a função de pertinência tem todos os valores dentro do intervalo $[0,1]$. Assim, quanto mais próximo seja $\mu_A(x)$ de 1, mais x pertencerá a A . Considerando A um subconjunto de X , este é caracterizado por um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{(x, \mu_A(x)), x \in X\} \quad (3.8)$$

A *função de pertinência* $\mu_A(x)$ fornece o grau de relacionamento do elemento:

$$\mu_A(x) \leftarrow f(x \in A) \quad (3.9)$$

Por essa razão, também é chamada de *função de relacionamento*. Uma *função de pertinência* bastante utilizada é a do tipo *triangular*, matematicamente expressa como:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{if } a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{if } b < x \leq c \\ 0 & \text{if } x > c \end{cases} \quad (3.10)$$

Dependendo do tipo de grandeza que se deseja representar, pode ser mais conveniente utilizar a função de pertinência trapezoidal, descrita abaixo.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{if } a < x \leq b \\ 1 & \text{if } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{if } c < x \leq d \\ 0 & \text{if } x > d \end{cases} \quad (3.11)$$

Um conjunto é completamente definido por seu vetor de pertinências. Isto é, para se determinar um conjunto *fuzzy* é suficiente se calcular os valores individuais de seu vetor de pertinências (Shaw & Simões, 1999). Assim, pode-se ter para um dado conjunto A (subconjunto de X):

$$A = \{\mu_1(x), \mu_2(x), \dots, \mu_n(x)\} \quad (3.12)$$

3.5.2 Variáveis Lingüísticas

Uma variável lingüística é uma variável cujos valores são nomes de conjuntos *fuzzy*. Por exemplo, a temperatura de um determinado processo pode ser uma variável lingüística assumindo valores: baixa, média e alta.

Estes valores são descritos por intermédio de conjuntos *fuzzy*, representados por funções de pertinência, conforme mostrado na Figura 3.5:

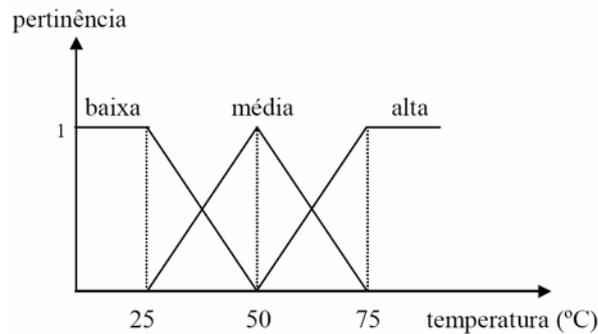


Figura 3.5 – Funções de pertinência para a variável *temperatura*.

A principal função das variáveis lingüísticas é fornecer uma maneira sistemática para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos. Em essência, a utilização do tipo de descrição lingüística empregada por seres humanos e não de variáveis quantificadas, permite o tratamento de sistemas que são muito complexos para serem analisados através de termos matemáticos convencionais.

3.5.3 Intersecção e União de Conjuntos *Fuzzy*

Diferentemente do que ocorre com as operações na lógica clássica *Booleana* (que é bivalente), as operações entre conjuntos *fuzzy* refletem a natureza probabilística, visto que em um vetor de pertinências, chamado de *vetor de possibilidades*, os graus de pertinências podem ser considerados como medidas que expressam a possibilidade de um dado elemento ser membro de um conjunto *fuzzy* (Shaw & Simões, 1999).

Intersecção

Seja E o universo de discurso e $x \in E$, $M = [0,1]$; Sejam os conjuntos $A \subset E, B \subset E$, então a intersecção $A \cap B$ é o maior subconjunto do universo de discurso E , o qual é ao mesmo tempo parte de A e também parte de B .

A intersecção é sempre menor que qualquer um dos conjuntos individuais A e B . Logo, o vetor de pertinência da intersecção $A \cap B$ é calculado dos valores individuais de A e B , da seguinte forma:

$$\forall x \in X, \mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (3.13)$$

União

Seja E o universo de discurso e $x \in E$, $M = [0,1]$; Sejam os conjuntos $A \subset E, B \subset E$, a união $A \cup B$ é o menor subconjunto do universo de discurso E , que inclui ambos os conjuntos *fuzzy* A e B . A união é sempre maior que qualquer um dos conjuntos individuais A e B . Logo, o vetor de pertinência da união $A \cup B$ é calculado dos valores individuais de A e B , da seguinte forma:

$$\forall x \in X, \mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (3.14)$$

3.5.4 Descrição de um Sistema Fuzzy

Apresenta-se na Figura 3-6, o processo pelo qual o espaço de entrada é submetido quando mapeado para um espaço de saída através de um sistema *fuzzy*. O espaço de entrada, ou seja, as variáveis de entrada sofrem três transformações até formarem um espaço de saída.

Primeiro, sofrem o processo de *fuzzyficação* que utiliza funções de pertinência definidas e mapeia cada variável do espaço de entrada. Depois, o mapa de regras é consultado, combinando graus de pertinência para formar as variáveis de saída.

Por último, efetua-se a *defuzzyficação*, que também utiliza funções de pertinência, para calcular as saídas do sistema.

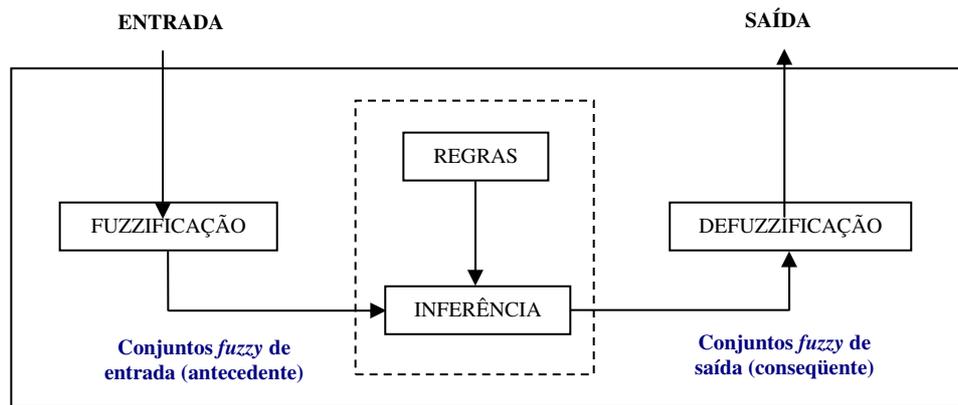


Figura 3.6 – Esquema simplificado de um sistema *fuzzy*.

Fuzzificação

É um mapeamento do domínio dos números reais para o domínio *fuzzy*, ou seja, é o processo de se calcular um valor para representar o grau de pertinência de um espaço de entrada, em um ou mais conjuntos *fuzzy*. Este processo permite que os termos lingüísticos façam sentido para os computadores, isto é, transforma valores qualitativos em valores quantitativos.

Inferência e Regras Fuzzy

Os sistemas de inferência e regras *fuzzy* são métodos de processamento da informação de natureza vaga ou imprecisa, baseados nos conceitos da teoria de conjuntos *fuzzy*. Estes sistemas são baseados em um conjunto de regras do tipo *se - então*. Consiste em realizar uma tarefa de acordo com a experiência prévia, com regras práticas e estratégias freqüentemente utilizadas. A implicação lógica é da seguinte forma:

SE < condição > ENTÃO < consequência >

SE A ENTÃO B.

Regras associam conseqüências com condições. No método heurístico constrói-se uma tabela de entradas e saídas. As condições, também são conhecidas como *antecedentes*, assim como as conseqüências são chamadas de *conseqüentes*. Podemos ter uma regra da seguinte maneira:

$$\text{SE } X_{in} = \text{BAIXO} \quad \text{ENTÃO} \quad X_{out} = \text{ALTO} .$$

onde *BAIXO* e *ALTO* são definidos através de funções de pertinência que descrevem a imprecisão de tais valores de entrada e saída. Pode-se notar que em vez de uma expressão numérica, foi utilizada uma expressão lingüística para descrever a relação entre a variável de entrada e a de saída.

Os sistemas *fuzzy* utilizam regras como associações *fuzzy*, isto é, para a regra “SE *A* ENTÃO *B*”, em que guarda a associação (*A*, *B*) em uma matriz *M* (matriz decisão). Esta matriz mapeia as relações do conjunto *fuzzy A* (antecedente) que irão estabelecer um conjunto *fuzzy B* (conseqüente).

A Inferência determina o grau de validade dos conseqüentes das regras e combina os resultados no conjunto *fuzzy* que vai para a *defuzzificação* e em seguida para a saída. Os métodos mais comuns são: a inferência *máx-min* e a inferência *máx-prod*, as quais são representadas, respectivamente por:

$$fs(i) = \max_k (\min(A(i), B(i))) \quad (3.15)$$

e

$$fs(i) = \max_k (A(i) * B(i)) . \quad (3.16)$$

em que:

i representa os valores de entrada;

k representa o número de regras *fuzzy* disparadas pela entrada *i*;

$A(i)$, $B(i)$ são os valores de i dentro da função de relacionamento dos conjuntos fuzzy A e B , respectivamente;

A função $\min()$ é a intersecção das funções de saídas obtidas por $A(i)$ e $B(i)$;

A função \max_k é a união das saídas produzidas pelas k regras disparadas por i .

Defuzzificação

A variável lingüística de saída, resultado das regras fuzzy, deve ser *defuzzyficada* para ser entendida no mesmo universo da ação de controle. É uma transformação inversa que traduz o domínio fuzzy para o domínio desejado. Os métodos de *defuzzificação* mais comuns são:

- Centro-da-Área (C-o-A)
- Centro-do-Máximo (C-o-M)
- Média-do-Máximo (M-o-M)

Neste trabalho utilizou-se o método Média-do-Máximo (M-o-M), que é mais recomendado para decisões mais qualitativas (Shaw & Simões, 1999). Neste, a saída precisa é obtida tomando-se a média entre os elementos extremos no universo que correspondem aos maiores valores da função de pertinência do conseqüente.

Capítulo 4

Algoritmos Genéticos para Otimização Multiobjetivo

Os algoritmos genéticos são métodos probabilísticos de otimização e busca inspirados nos mecanismos de evolução natural. Foram introduzidos por John Holland em 1975, mas realmente se popularizaram a partir da publicação, em 1989, do livro *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, de autoria de David Goldberg, que desde então é referenciado em qualquer trabalho que aborde o tema.

Quando um algoritmo genético é aplicado a um problema de otimização, cada solução do problema deve ser codificada ou representada na forma de uma estrutura finita (vetor, matriz, etc.). Em seguida, devem ser definidos os operadores genéticos de seleção, recombinação, mutação e estratégias de elitismo. Estes operadores devem ser escolhidos de acordo com as características intrínsecas do problema. Antes de aplicar o AG para resolver um problema de otimização, vários parâmetros devem ser especificados, tais como: tamanho da população, probabilidade de recombinação e probabilidade de mutação.

A maioria das publicações para problemas de otimização multiobjetivos são baseadas em algoritmos genéticos (Ehr Gott & Gandibleux, 2000; Coello, 2000; Van Veldhuizen & Lamount, 2000; Jones et al, 2002). Esta preferência se deve ao fato de que os AG trabalham com uma população de soluções que podem conter informação sobre várias regiões do espaço de busca, e, portanto, oferecem maiores possibilidades para encontrar o conjunto Pareto-ótimo ou uma aproximação dele.

Depois do primeiro algoritmo genético multiobjetivo, (*Vector Evaluated Genetic Algorithm* - VEGA), proposto por Schaffer (1985), várias extensões de algoritmos genéticos, para problemas multiobjetivos, foram sugeridas de diferentes maneiras (Horn & Nafpliotis, 1993; Fonseca & Fleming, 1993; Srinivas & Deb, 1995; Ishibuchi & Murata, 1998; Zitzler & Thiele, 1999 e Zitzler et al, 2002).

A diferença principal entre um AG multiobjetivo e um AG mono-objetivo reside na forma como se atribui o nível de aptidão (*fitness*) às soluções. Devido à indiferença existente entre as soluções dominantes de um problema multiobjetivo, é necessário definir algumas estratégias para calcular o *fitness* das soluções e selecionar as soluções com maior probabilidade de reprodução.

4.1 Técnicas de Seleção e Cálculo de *Fitness*

Em um AG convencional, a seleção das soluções *pais*, que se reproduzirão, é feita de acordo com o *fitness* das soluções na população corrente. Em otimização mono-objetivo a função *fitness* e a função objetivo de uma solução geralmente coincidem, ou a primeira depende da segunda. No entanto, em otimização multiobjetivo, os objetivos são considerados separadamente, sendo necessário definir critérios adequados para calcular o *fitness* e a probabilidade de reprodução das soluções.

Goldberg (1989) sugere o uso do conceito de *dominância* de Pareto para calcular o *fitness* das soluções e apresenta um esboço de um procedimento iterativo denominado "*ranking*". Neste procedimento, inicialmente, atribui-se às soluções dominantes da população um valor *rank* = 1. Desconsiderando temporariamente estas soluções, determinam-se as novas soluções dominantes da população restante para atribuir-lhes *rank* = 2. Este procedimento continua até que toda a população seja classificada. O *rank* de uma solução determina o potencial de reprodução (*fitness*). Observa-se que as melhores soluções possuirão menor *rank* e o *fitness* de uma solução particular depende da relação de *dominância* entre as outras soluções. Goldberg sugere ainda que se adote algum mecanismo de nicho, de modo a distribuir os indivíduos por toda a fronteira ideal de Pareto.

Diversidade das Soluções

A população de soluções em um AG mono-objetivo, em geral, tende a convergir para uma única solução. Este comportamento pode ser aceitável quando se deseja encontrar uma única solução ótima ou uma aproximação. Entretanto, em otimização multiobjetivo, se a diversidade da população não é preservada, ela pode convergir para regiões pequenas do espaço objetivo. Portanto, manter a diversidade da população é crucial para encontrar um conjunto de soluções dominantes; cujos pontos estejam bem distribuídos ao longo de toda a fronteira de Pareto.

Goldberg & Richardson (1987) propõem uma técnica denominada *fitness sharing*, que consiste em dividir a população em diferentes subpopulações (nichos) de acordo com a proximidade das soluções. A idéia desta técnica é penalizar o *fitness* de soluções que estão muito próximas numa dada subpopulação. A proximidade das soluções é determinada através de uma função no espaço de decisões X ou no espaço objetivo Z , chamada de função *sharing*:

$$Sh(d(x, y)) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{d(x, y)}{\sigma_{sh}} \right)^\alpha, & \text{se } d(x, y) < \sigma_{sh} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.1)$$

em que:

$d(x, y)$ é uma distância entre duas soluções x e y , pertencente à subpopulação;

σ_{sh} é a distância máxima (raio) permitida entre quaisquer duas soluções pertencentes à subpopulação;

α é um parâmetro que normalmente é 1 ou 2.

O valor do parâmetro σ_{sh} influencia bastante o desempenho dos AG. Por isso, Fonseca & Fleming (1993) sugerem métodos para calcular este parâmetro.

Deb et al (2002) propuseram uma outra técnica para preservar a diversidade na população. Inicialmente, a população é classificada em subpopulações, da mesma forma sugerida por Goldberg (1989). As soluções pertencentes a uma dada subpopulação S possuem o mesmo nível de *dominância*, ou seja, elas são *indiferentes*. Para atribuir um *fitness* a estas soluções, a técnica proposta é baseada na proximidade das soluções. Para cada solução $x \in S$, determina-se uma estimativa do número de soluções que rodeiam a imagem da solução x no espaço objetivo Z . Inicialmente os pontos, correspondentes às soluções em S , são ordenados em forma crescente do primeiro objetivo. Suponha que a ordenação seja: z^1, \dots, z^{np} , em que np é o número de soluções na subpopulação S . Para cada ponto z^i calcula-se a distância:

$$d_1(z^i) = f_1(z^{i+1}) - f_1(z^{i-1}) \quad (4.2)$$

Ordenando os pontos de acordo com os outros objetivos, calcula-se de maneira similar: $d_2(z^i), \dots, d_r(z^i)$. Então, a estimativa do número de pontos situados em redor de um ponto z^i é dada por:

$$dist(z^i) = \sum_{j=1}^r d_j \quad (4.3)$$

Esta medida é chamada de *distância crowding*, que representa uma estimativa do tamanho do maior "cubóide" cobrindo o ponto z^i , sem incluir nenhum outro ponto. Aos pontos z^1 e z^{np} , são associados valores da *distância crowding* arbitrariamente grande.

4.2 Algoritmos Genéticos Multiobjetivos da Literatura

Apresentam-se a seguir os AG multiobjetivos mais importantes da literatura. Inicialmente, um AG não baseado no conceito de *dominância* de Pareto (VEGA) e em seguida; os que se baseiam neste conceito (proposto por Goldberg em 1989). Os algoritmos são: MOGA, NPGA, NSGA, NSGA II, SPEA e SPEA2, sendo este último, o método aplicado nesta Tese.

4.2.1 VEGA – (Vector Evaluated Genetic Algorithm– Schaffer– 1985)

A principal diferença em relação ao algoritmo genético convencional é o emprego de um operador especial de seleção. Este foi modificado de forma que a cada geração, diversas subpopulações são criadas, uma para cada objetivo. Dessa forma, um problema com k objetivos, k subpopulações de tamanho N/k , sendo N o tamanho máximo da população, são geradas da seguinte forma: considerando o objetivo i , monta-se uma roleta ponderada segundo a avaliação de todos os indivíduos da população para este

objetivo i e geram-se aleatoriamente N/k indivíduos, repetindo-se o processo para os demais objetivos.

Portanto, em VEGA, a seleção é feita separadamente para cada objetivo e uma vez gerada as k subpopulações P_j , constrói-se a população "*mating pool*" formada pela união ou mistura das subpopulações: $P' = P_1 \cup \dots \cup P_k$ com $|P'| = N$. Em seguida, de maneira usual, aplicam-se os operadores de recombinação e mutação a esta população.

Embora Schaffer tenha obtido resultados razoáveis, ele notou algumas deficiências do VEGA causadas pela forma de seleção, que dá preferência aos pontos no espaço objetivo localizados nos extremos da fronteira Pareto. O resultado é que, em geral, a população converge para regiões pequenas. O comportamento do VEGA foi testado em problemas de minimização de funções contínuas não lineares.

4.2.2 MOGA – (*Multiobjective Genetic Algorithm* – Fonseca & Fleming – 1993)

A abordagem proposta por Fonseca & Fleming (1993), inclui um esquema no qual a classificação de cada indivíduo é dada pelo número de indivíduos que o dominam. Por exemplo, a classificação de um indivíduo x_i na geração t , que é *dominado* por $p_i^{(t)}$ indivíduos nesta geração, é dada pela equação (3.4).

$$\text{rank}(x_i, t) = 1 + p_i^{(t)} \quad (4.4)$$

4.2.3 NPGA – (*Niched Pareto Genetic Algorithm* – Horn & Nafpliotis -1994)

O algoritmo utiliza um mecanismo de seleção baseada em torneio, utilizando a relação de *dominância* como critério de escolha. A diferença no torneio empregado é que ele não se restringe a dois indivíduos.

Um número determinado de indivíduos (usualmente 10) da população é utilizado para determinar a *dominância*. Quando ambos os competidores são *dominados* ou *não-dominados*, o resultado do torneio é decidido pela divisão da função de adaptação: o indivíduo que estiver no menor nicho (com o menor número de indivíduos) é tomado como vencedor do torneio. A competidora, que estiver “mais distante” das soluções já selecionadas, isto é, aquela que possua o menor número de soluções em sua vizinhança (*niche*), será a ganhadora. Vale ressaltar que, neste método, a comparação das soluções é feita no espaço objetivo, ou seja, considerando os pontos imagens das soluções.

A grande vantagem deste tipo de algoritmo genético é a rapidez, pois a seleção restrita a uma pequena parte da população ajuda a reduzir o tempo gasto. Um dos problemas associados ao NPGA refere-se à escolha do tamanho do torneio: o desempenho do algoritmo tem muita relação com esta escolha.

4.2.4 NSGA – (Nondominated Sorting Genetic Algorithm - Srinivas & Deb - 1994)

Este algoritmo baseia-se na abordagem de Goldberg (1989). No NSGA a população P é classificada em K subpopulações (fronteiras) de acordo com a *dominância* das soluções ($P = F_1 \cup F_2 \dots \cup F_k$). Inicialmente, para cada solução de uma dada fronteira atribui-se um mesmo potencial de reprodução, ou seja, um mesmo valor de *fitness* que depende do tamanho da população. Para preservar a diversidade da população do algoritmo genético, as soluções em cada fronteira são submetidas a um *fitness sharing* (Goldberg & Richardson, 1987); penalizando-se as soluções que estão muito próximas às outras soluções na fronteira.

No processo de seleção de soluções *pais*, as soluções dominantes terão maiores chances de serem escolhidas. Portanto, a busca será direcionada para as regiões dominantes. Isto poderia causar uma convergência rápida da população. No entanto, a

estratégia de diversificação *fitness sharing* ajuda a distribuir as soluções sobre as regiões dominantes. Ressalta-se que o *fitness sharing* no algoritmo NSGA foi realizado considerando o espaço de decisões (X), o que poderia garantir uma melhor distribuição das soluções, ao se aceitar soluções diferentes, mas com mesmos vetores objetivos (Coello, 2000). Srinivas & Deb (1994) avaliaram o comportamento do NSGA na resolução de três problemas contínuos de programação não linear.

Nos estudos comparativos realizados por Coello (1996) foi evidenciado que o desempenho do NSGA seria inferior ao MOGA, e também bastante sensível à divisão da função de adaptação.

4.2.5 SPEA – (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm* - Zitzler & Thiele - 1999)

Uma inovação foi proposta por Zitzler & Thiele (1999) onde incorporaram novas técnicas e combinam as melhores estratégias de vários AG multiobjetivos previamente publicados. No SPEA, considera-se uma população adicional \bar{P} , onde são armazenadas as soluções dominantes encontradas até o momento da busca (soluções de elite). Esta população participa da reprodução juntamente com a população corrente P , ou seja, a cada geração constrói-se a população combinada $P \cup \bar{P}$, calculam-se os *fitness* das soluções desta população combinada e aplicam-se os operadores genéticos.

O valor do *fitness* de uma solução dominante $x' \in \bar{P}$ depende do número de soluções que x' domina e o *fitness* de qualquer outra solução $x \in P$; depende fortemente do número de soluções dominantes ($\in \bar{P}$) que dominam x .

Esta forma de atribuir o *fitness* das soluções garante que a busca seja guiada em direção às regiões das soluções dominantes. Como a população de soluções dominantes pode crescer com o tamanho do problema, Zitzler & Thiele (1999) usaram uma técnica determinística de redução denominada *clustering* proposta por Morse (1980).

Esta técnica particiona o conjunto de soluções dominantes \bar{P} em \bar{N} ($\bar{N} < |\bar{P}|$) grupos (*clusters*) de acordo com a proximidade das soluções. Para cada *cluster* se seleciona uma solução representativa e as soluções restantes são descartadas. A técnica de *clustering* é aplicada aos vetores objetivos das soluções, ou seja, sobre o espaço objetivo.

A principal diferença deste método com o método de *fitness sharing* (Goldberg & Richardson, 1987), é que as vizinhanças (*niches*) não estão definidas em função de uma distância, mas sim em função da *dominância* de Pareto. Portanto, não é necessário o uso de nenhum parâmetro adicional como σ_{sh} (raio *niche*). O algoritmo SPEA foi aplicado para resolver o problema da mochila e o problema do caixeiro viajante ambos multiobjetivos. Nos experimentos realizados por Zitzler & Thiele (1999) mostrou-se que, para as funções de teste apresentadas, o SPEA teve o melhor desempenho em relação aos quatro algoritmos genéticos comentados anteriormente (VEGA, MOGA, NPGA e NSGA). Os critérios de desempenho adotados foram: diversidade de soluções e aproximação da fronteira de Pareto.

4.2.6 NSGA II– (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm II* – Deb et al - 2002)

O algoritmo NSGA-II baseia-se em ordenamento elitista por *não-dominância*. O NSGA-II usa a população *pai* P para gerar a população *filha* Q como nos AG convencionais.

Na primeira iteração, gera-se uma população P_0 , que é ordenada por *não-dominância*. Cada solução tem um valor de aptidão igual ao seu nível de *não-dominância* (1 é o melhor nível, 2 é o seguinte melhor e assim por diante). Depois, aplicando os operadores de seleção por torneio, cruzamento e mutação, obtém-se a população *filha* Q_0 .

Tanto P como Q são de tamanho N e ambas as populações são unidas em uma população $R_0 = P \cup Q$, com $|R| = 2N$. Para as seguintes gerações $n = 1, 2, \dots$, o algoritmo NSGA-II trabalha com a população R_n . Esta técnica classifica a população em K conjuntos F_1, \dots, F_k , onde as soluções de cada conjunto F_i , $i = 1, \dots, k$, possuem o mesmo nível de *dominância*. Após classificar a população, um valor de *fitness* deve ser atribuído às soluções de cada conjunto F_k . O cálculo é feito de maneira que as “melhores” soluções possuam maiores valores de *fitness*. É claro que os valores de *fitness* das soluções no conjunto F_k devem ser maiores que os das soluções no conjunto F_j , $j < k$.

Os valores de *fitness* atribuídos às soluções do conjunto F_k são calculados através de uma estratégia que tenta preservar a dispersão da população. Para cada solução $z \in F_j$, determina-se a estimativa do número de pontos localizados em redor dele. Esta estimativa é denominada de distância de *crowding*, também chamado na literatura de distância de multidão.

O *fitness* de uma solução $x \in F_j$ é a soma da sua distância de *crowding* e do máximo *fitness* em F_{j+1} ; portanto as soluções em F_j são mais aptas que as soluções em F_{j+1} . Observa-se que para problemas de minimização e maximização, o *fitness* é maximizado, ou seja, valores altos deste correspondem a grandes probabilidades de seleção. Após calcular os *fitness* de todas as soluções da população P_t , são executados os operadores de seleção, recombinação e mutação construindo uma nova população de N soluções descendentes. A principal vantagem do NSGA-II é a maneira como mantém a diversidade entre as soluções *não-dominadas*. O método de comparação por multidão é usado para a seleção por torneio e para escolher os elementos da fronteira F_i . O cálculo da distância de multidão não requer o parâmetro σ_{sh} , como no MOGA e no NSGA.

4.2.7 SPEA2 – (Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2 – Zitzler et al – 2002)

O algoritmo SPEA2 usa uma população normal P_t de tamanho N e uma população externa \bar{P}_t de tamanho \bar{N} , também chamada de *archive*, onde são guardadas as soluções *não-dominadas*.

O algoritmo inicia criando uma população aleatória P_0 e uma população externa \bar{P}_t inicialmente vazia. O valor de aptidão para as soluções de $Q = P_t \cup \bar{P}_t$ é obtido em várias etapas. Primeiro, um valor de aptidão $s(i)$ (*strenght fitness*) é encontrado usando a equação (4.5).

$$s(i) = \left| \{j, j \in Q, \text{ tal que } i \prec j\} \right| \quad (4.5)$$

O valor $s(i)$ é o número de soluções que i domina em Q . Depois, calcula-se o valor $r(i)$ (*raw fitness*), conforme equação:

$$r(i) = \sum_{j \in Q, j \prec i} s(j) \quad (4.6)$$

Isto significa que $r(i)$ é a soma dos $s(j)$ das soluções j que dominam i em Q , sendo que para as soluções *não-dominadas* tem-se que $r(i) = 0$. Soluções com um $r(i)$ alto são *dominadas* por muitas soluções em Q . Apresenta-se na Figura 4.1 um conjunto de soluções e seus valores $(r(i), s(i))$.

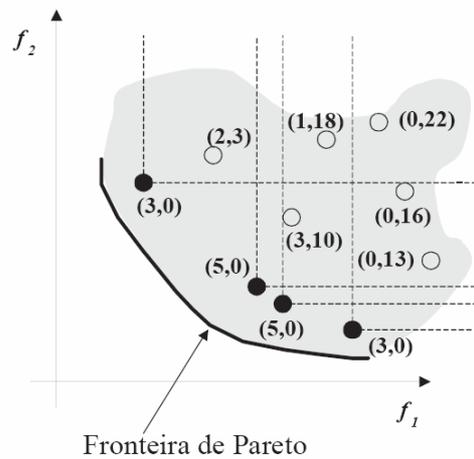


Figura 4.1 – Conjunto de soluções em um problema de minimização com dois objetivos.

Conforme os autores, este mecanismo permite uma espécie de ordenação de soluções por *dominância*, mas pode falhar quando existem muitas soluções *não dominadas*. Neste caso, existiriam muitas soluções com $r(i) = 0$ e não se enfatizaria a preferência de uma solução sobre uma outra.

Para resolver este problema, SPEA2 usa uma informação de densidade, baseada no método de *k-vizinhos*, onde a densidade em qualquer ponto é uma função decrescente em relação ao *k-ésimo* ponto mais próximo. Para cada solução i em Q , obtêm-se as distâncias aos $|Q|-1$ indivíduos de Q . Logo, estas distâncias são ordenadas em ordem ascendente. A densidade $d(i)$ é formulada como:

$$d(i) = \frac{1}{\sigma_i^k + 2} \quad (4.7)$$

A densidade de i é inversamente proporcional à distância para seu *k-vizinho* mais próximo σ_i^k , em que $k = \sqrt{|Q|}$. Finalmente, a aptidão calculada para a solução i é:

$$F(i) = r(i) + d(i) \quad (4.8)$$

Tendo em vista que as soluções *não-dominadas* têm $r(i) = 0$ e que $d(i) < 1$, estas terão $F(i) < 1$ e as demais $F(i) \geq 1$.

Uma vez calculado o valor de aptidão, tem-se em seguida a seleção dos indivíduos *não-dominados* que irão compor a população externa (*archive*) da próxima geração. Esta etapa é chamada de *environmental selection* e consiste em copiar as soluções *não-dominadas* de Q para a população externa da geração seguinte \bar{P}_{t+1} . Lembrando que $Q = P_t \cup \bar{P}_t$, temos:

$$\bar{P}_{t+1} = \{i \mid i \in Q \wedge F(i) < 1\} \quad (4.9)$$

Depois disto, existem três possíveis situações:

1. $|\bar{P}_{t+1}| = \bar{N}$. O número de indivíduos *não-dominados* é igual ao tamanho do arquivo e neste caso não se faz qualquer alteração sobre o arquivo $|\bar{P}_{t+1}|$;
2. $|\bar{P}_{t+1}| < \bar{N}$. O número de indivíduos *não-dominados* é menor do que o tamanho do arquivo. Daí ordena-se Q por $F(i)$ e copiam-se as primeiras $\bar{N} - |\bar{P}_{t+1}|$ soluções i de Q , tal que $F(i) \geq 1$. Em resumo, completa-se o arquivo com as “melhores” soluções *dominadas*;
3. $|\bar{P}_{t+1}| > \bar{N}$. O número de indivíduos *não-dominados* é maior do que o tamanho do arquivo. Neste caso utiliza-se o algoritmo de corte do SPEA2 para eliminar soluções até que $|\bar{P}_{t+1}| = \bar{N}$.

Finalmente, se realiza o processo de seleção por torneio (com reposição) para formar a população intermediária (*mating pool*). Na seleção para formar a *mating pool* escolhe-se somente do conjunto dos *não-dominados* (*archive*).

A partir deste, são feitos os cruzamentos e mutações para formar a população normal, de tamanho N , da geração seguinte P_{t+1} .

Algoritmo de Corte do SPEA2

O algoritmo de corte do SPEA2 reduz o tamanho de \bar{P}_{t+1} para \bar{N} . Em cada iteração escolhe-se uma solução tal que a sua distância para o seu vizinho mais próximo seja a menor possível. No caso de empate, se calcula a segunda menor distância e assim por diante. Formalmente, em cada iteração uma solução i é eliminada tal que $i \leq_d j$ para todas as $j \in \bar{P}_{t+1}$. Formalmente,

$$i \leq_d j: \Leftrightarrow \forall 0 < k < |\bar{P}_{t+1}|: \sigma_i^k = \sigma_j^k \vee \exists 0 < k < |\bar{P}_{t+1}|: \left[\left(\forall 0 < l < k: \sigma_i^l = \sigma_j^l \right) \wedge \sigma_i^k < \sigma_j^k \right] \quad (4.10)$$

A distância para o k -vizinho mais próximo σ_i^k agora é calculada entre as soluções do arquivo \bar{P}_{t+1} e não para o conjunto $Q = P_t \cup \bar{P}_t$, como foi calculado antes na equação (4.7). Na Figura 4.2 ilustra-se o fato de que o algoritmo de corte dá preferência para eliminar soluções que estão muito próximas, de modo a se garantir uma melhor distribuição das mesmas e consequentemente uma boa diversidade ao longo da fronteira.

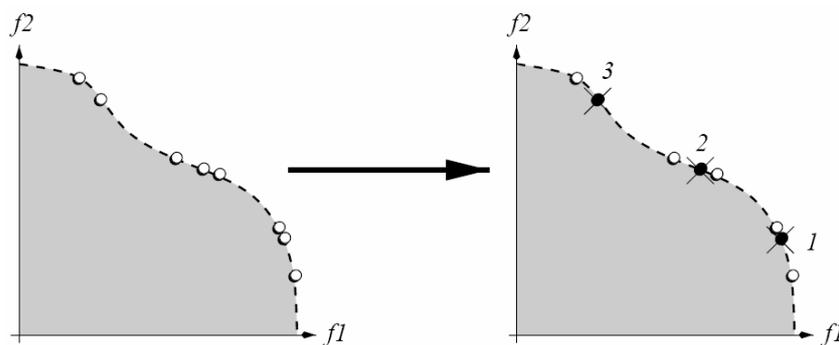


Figura 4.2 – Algoritmo de corte do SPEA2 em um problema de minimização com dois objetivos. Fonte: (Zitzler et al, 2004).

Apresenta-se a seguir o algoritmo do SPEA2 de acordo com Zitzler et al (2002):

- Entrada: N (tamanho da população normal)
 \bar{N} (tamanho da população externa chamada de arquivo)
 t, T (contador e número máximo de gerações, respectivamente)
- Saída: A (grupo de indivíduos *não-dominados*)
- Passo 1: Inicialização: gerar uma população inicial P_0 e criar uma população externa (arquivo) inicialmente vazia. $\bar{P}_0 = \phi$. Faça $t = 0$ e $Q_0 = P_0 \cup \bar{P}_0$.
- Passo 2: Cálculo da *fitness*: para cada indivíduo $i \in Q$, calcular $s(i), r(i), d(i)$ e $F(i)$, segundo as equações (4.5), (4.6), (4.7) e (4.8), respectivamente.
- Passo 3: *Environmental selection*: copiar todas as soluções *não-dominados* $\in Q$ para o arquivo da próxima geração \bar{P}_{t+1} .
- 3.1 Se $|\bar{P}_{t+1}| = \bar{N}$ vá para o passo 4.
 - 3.2 Se $|\bar{P}_{t+1}| < \bar{N}$, ordenar Q por $F(i)$ e copiar as primeiras $\bar{N} - |\bar{P}_{t+1}|$ soluções i de Q , tal que $F(i) \geq 1$ para completar \bar{P}_{t+1} .
 - 3.3 Se $|\bar{P}_{t+1}| > \bar{N}$ utilizar o algoritmo de corte até que $|\bar{P}_{t+1}| = \bar{N}$.
- Passo 4: Parada. Se $t \geq T$ ou outro critério de parada for satisfeito, fazer $A = \bar{P}_{t+1}$ e pare. Se não, vá para o passo 5.
- Passo 5: *Mating Selection*. Efetuar a seleção por torneio, com reposição, com os indivíduos de \bar{P}_{t+1} para formar o *mating pool*.
- Passo 6: Aplicar cruzamento e mutação com os indivíduos do *mating pool* e gerar a nova população P_{t+1} . Incrementar o contador de gerações $t = t + 1$ e voltar ao passo 2.

Capítulo 5

A Formulação do Problema

O problema de planejamento integrado de bancos de capacitores e de reguladores de tensão em redes de distribuição é formulado neste trabalho como um problema de otimização combinatória para ser resolvido utilizando um algoritmo híbrido composto por lógica *fuzzy* e um algoritmo genético multiobjetivo. O algoritmo adotado é o SPEA2 (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm* – Zitzler et al, 2002). Resolver o problema significa determinar as barras onde serão instalados os bancos de capacitores fixos e chaveados, a programação dos chaveados, bem como determinar a barra onde será instalado o banco de reguladores de tensão e os *taps* em que deverá operar em todos os patamares da curva de carga.

Considerou-se o modelo de carga de potência constante; capacitores de impedância constante (Apêndice B); alimentador radial com modelo simplificado contendo apenas a impedância do trecho (visto ser desprezível a admitância em derivação). O banco de unidades monofásicas ($\pm 10\%$ e 32 degraus) na configuração delta fechado (Apêndice C) foi considerado para reguladores de tensão devido a este ter uma maior faixa de regulação ($\pm 15\%$).

5.1 Formulação Geral

Um problema de otimização deve buscar uma solução ou um conjunto de soluções que representem a minimização ou maximização de determinado problema atendendo a um conjunto de restrições. Assim,

Minimizar ou maximizar:

$$J(U, V) \quad (5.1)$$

sujeito a:

$$\varphi = 0 \text{ e } \delta \leq 0 \quad (5.2)$$

sendo:

J é função a ser minimizada ou maximizada;

φ é o vetor de restrições de igualdade;

δ é o vetor de restrições de desigualdade;

U é o conjunto de variáveis dependentes;

V é o conjunto de variáveis independentes.

Para o problema multiobjetivo volt/var, apresenta-se na seção 5.6 a formulação em termos de otimização multiobjetivo, conforme definição geral do problema de otimização multiobjetivo (definido na seção 3.1).

5.2 Critérios para a Localização Ótima

Quando se tem até dois bancos de reguladores de tensão em série a serem instalados, alguns critérios devem ser atendidos no processo de otimização. Um número maior de bancos é pouco usual, visto que podem vir a ocorrer problemas na coordenação da proteção da rede.

Os principais critérios para alocar os bancos de reguladores de tensão são:

1. Tentar manter a tensão em todas as barras, dentro dos limites normais;
2. Localizar os bancos em locais que permitam atender ao maior número possível de consumidores, levando em conta a potência calculada dos mesmos e já prevendo um horizonte de crescimento de carga;
3. Calcular a potência dos reguladores a serem alocados e verificar se os mesmos suportam os fluxos nos trechos onde forem localizados; sendo que este critério é mais relevante para reguladores próximos da barra da subestação, uma vez que, nos primeiros trechos do tronco, os fluxos são de grande magnitude;
4. Não localizar os bancos de reguladores onde existam bancos de capacitores, devido a possíveis problemas de surtos de manobras ou limitação do espaço físico;

Para localizar os bancos de capacitores, os principais critérios são definidos na redução do espaço de busca e na formulação da função objetivo de capacitores. O objetivo é minimizar as perdas de energia e os custos, além da melhoria do fator de potência da rede e dos níveis de tensão de barra em todos os patamares da curva de carga.

O atendimento a esses critérios exige um método de otimização que seja capaz de contemplar a característica discreta do problema e sem aproximações. Neste contexto, o SPEA2 se aplica bem para o planejamento integrado de bancos de capacitores e de reguladores de tensão em redes de distribuição.

A lógica *fuzzy* é aplicada para selecionar as barras candidatas para alocação dos capacitores e reguladores de tensão; de forma a atender os critérios acima estabelecidos; além de reduzir consideravelmente o espaço de busca.

5.3 Redução do Espaço de Busca

A lógica *fuzzy* aqui implementada é um processamento realizado antes de dar início ao SPEA2 e tem como finalidade, limitar o espaço de busca para instalação dos reguladores de tensão e capacitores, de modo a se obter um conjunto de barras candidatas contendo somente soluções factíveis. O conhecimento especialista do problema foi utilizado para estabelecer os critérios que permitem eliminar as barras que possam representar soluções infactíveis.

Uma ferramenta importante utilizada na etapa de implementação foi a *toolbox fuzzy* do Matlab, onde foram seguidas as seguintes etapas:

- Definição das variáveis de entrada e saída com suas respectivas representações em variáveis lingüísticas;
- Composição das regras;
- Escolha do método de inferência;
- Escolha do método de *defuzzificação*;
- Verificação dos índices de saída de acordo com os ajustes das regras.

Utilizou-se a inferência *máx-min* e a *defuzzificação da média dos máximos* (M-o-M).

5.3.1 – Reguladores de Tensão

Neste trabalho utilizou-se, no processo de otimização, a potência de reguladores de tensão em unidades padronizadas; de acordo com a classe de tensão do alimentador de distribuição. O cálculo da potência dos reguladores é um parâmetro essencial, pois está relacionada diretamente aos custos de aquisição do equipamento e

permite através da composição de regras, utilizando lógica *fuzzy*, inserir o conhecimento especialista para guiar na busca da região provável onde se encontra o ponto ótimo de instalação.

A avaliação do estado da arte indica que o uso da potência do regulador de tensão como um dos critérios para a localização ótima deste equipamento, constitui-se em uma idéia inovadora. Os trabalhos específicos sobre esse tema como, por exemplo, Safigianni & Salis (2000) e Mendoza et al (2007), só especificam a potência do regulador no final do processo de otimização e ainda assim em valores que não estão coerentes com o que dispõe a norma IEEE *Standard* C57.15-1999, referentes às potências das unidades padronizadas de acordo com a classe de tensão.

Inicialmente, calcula-se um fluxo de carga (Das et al, 1995) considerando o pior caso: condição de carga de pico e sem equipamentos instalados no alimentador. De posse dos valores dos fluxos em todos os trechos, calcula-se a potência do regulador para cada barra, caso fosse ali instalado. O cálculo da potência do regulador de tensão é apresentado em detalhes no Apêndice C, junto com uma tabela de um grande fabricante (*Cooper Power Systems*), segundo a norma IEEE *Standard* C57.15-1999.

As variáveis de entrada utilizadas na lógica *fuzzy* são: a *tensão de barra* e a *potência do regulador*. A variável de saída (chamada de *índice de saída*) obtida para cada barra reflete a possibilidade de se considerar ou não a barra como sendo candidata a participar do processo de otimização para alocação dos reguladores.

Apresentam-se a seguir para cada variável, as respectivas codificações em variáveis lingüísticas, conforme preceitos da lógica *fuzzy* e que refletem diretamente a aplicação do conhecimento especialista do problema. Em seguida, apresentam-se nas Figuras 5.1 e 5.2, as funções de pertinência (triangular e trapezoidal) de cada variável.

Tensão de barra

B – Baixo

MB – Médio Baixo

M – Médio

A - Alto

MA – Médio

A – Alto

Potência do Regulador

MuB – Muito Baixo

B – Baixo

MB – Médio Baixo

M – Médio

MA – Médio Alto

A – Alto

MuA – Muito Alto

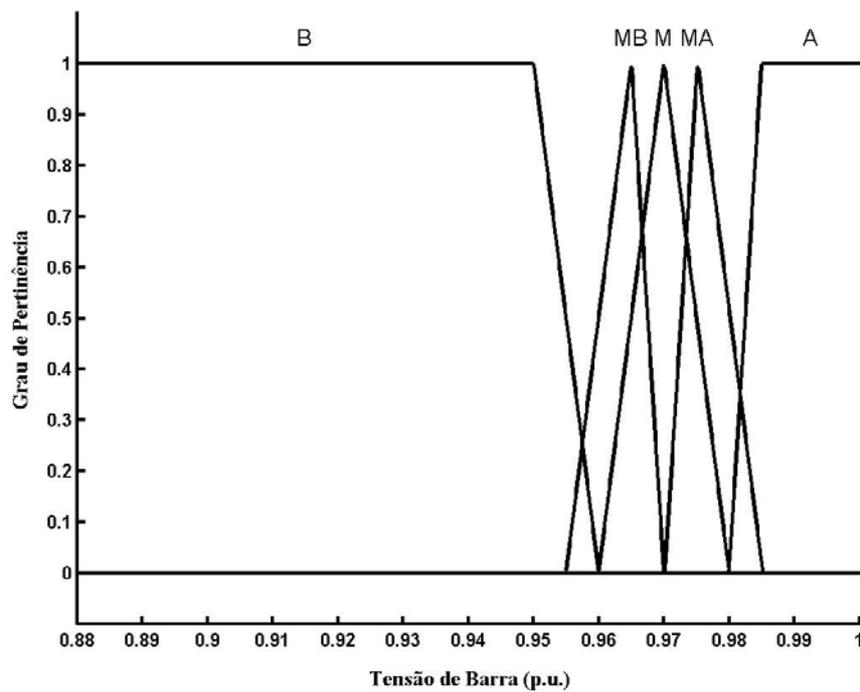


Figura 5.1 – Funções de pertinência para a variável de entrada: tensão de barra.

Para a variável *tensão de barra* considerou-se não instalar o regulador em barras cuja tensão já esteja abaixo de 0.95 p.u. Recomenda-se também não instalar em uma barra cuja tensão esteja em torno de 0.98 p.u, o que pode indicar que é uma barra próxima da subestação.

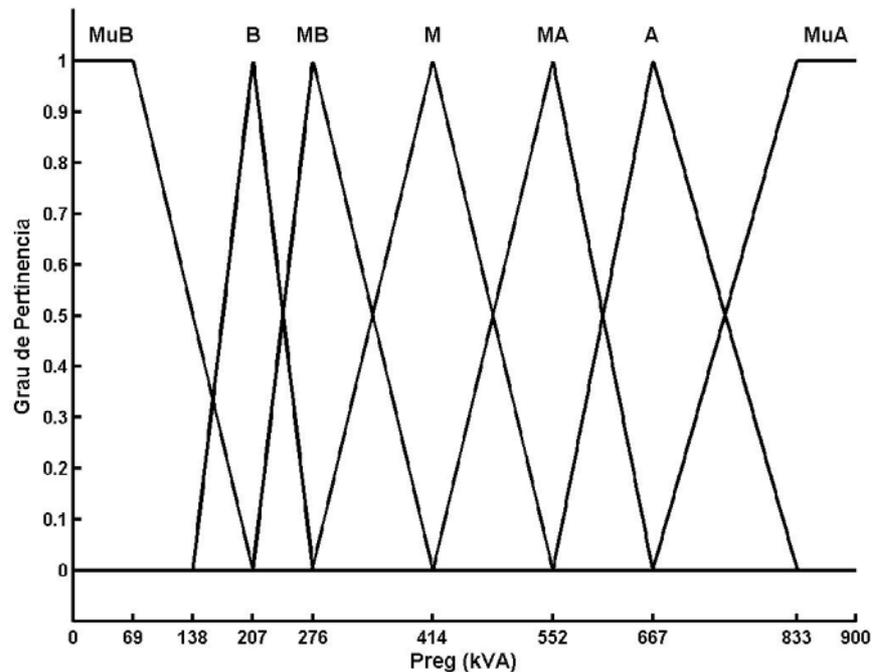


Figura 5.2 – Funções de pertinência para a variável de entrada: potência do regulador.

Na composição da variável *potência do regulador*, utilizaram-se como limites de cada função de pertinência os valores de potência (kVA) das unidades padronizadas e disponíveis no mercado pelos fabricantes de reguladores de tensão. Para o nível de 13.8 kV, os valores disponíveis são: 69, 138, 207, 276, 414, 552, 667 e 833 kVA (Apêndice C).

Definidas as variáveis de entrada, o próximo passo consistiu em compor as regras. Estas é que definem, de fato, a inserção do conhecimento especialista.

Algumas regras exprimem, de forma contundente, a maneira de se inserir o conhecimento especialista do problema. Por exemplo, a regra 1 indica que se a tensão na barra é baixa, então o índice é baixo. Outras regras que conjugam ao mesmo tempo (através da operação AND) as variáveis de entrada, expressam a flexibilidade que a lógica *fuzzy* apresenta. Apresentam-se a seguir, as regras utilizadas para a redução do espaço de busca para reguladores de tensão.

1. Se	(Vbarra é B)	então	(Índice é B)
2. Se	(Vbarra é MB) e (Sreg é B)	então	(Índice é MB)
3. Se	(Vbarra é MB) e (Sreg é MB)	então	(Índice é M)
4. Se	(Vbarra é MB) e (Sreg é M)	então	(Índice é A)
5. Se	(Vbarra é MB) e (Sreg é MA)	então	(Índice é A)
6. Se	(Vbarra é MB) e (Sreg é A)	então	(Índice é MA)
7. Se	(Vbarra é M) e (Sreg é MB)	então	(Índice é M)
8. Se	(Vbarra é M) e (Sreg é M)	então	(Índice é A)
9. Se	(Vbarra é M) e (Sreg é MA)	então	(Índice é A)
10. Se	(Vbarra é M) e (Sreg é A)	então	(Índice é MA)
11. Se	(Vbarra é M) e (Sreg é B)	então	(Índice é MB)
12. Se	(Sreg é MuB)	então	(Índice é B)
13. Se	(Vbarra é A)	então	(Índice é B)
14. Se	(Vbarra é MA)	então	(Índice é MB)

A variável de saída expressa a aceitação que uma determinada barra terá para se instalar ou não o regulador de tensão. Apresenta-se na Figura 5.3 a sua representação gráfica.

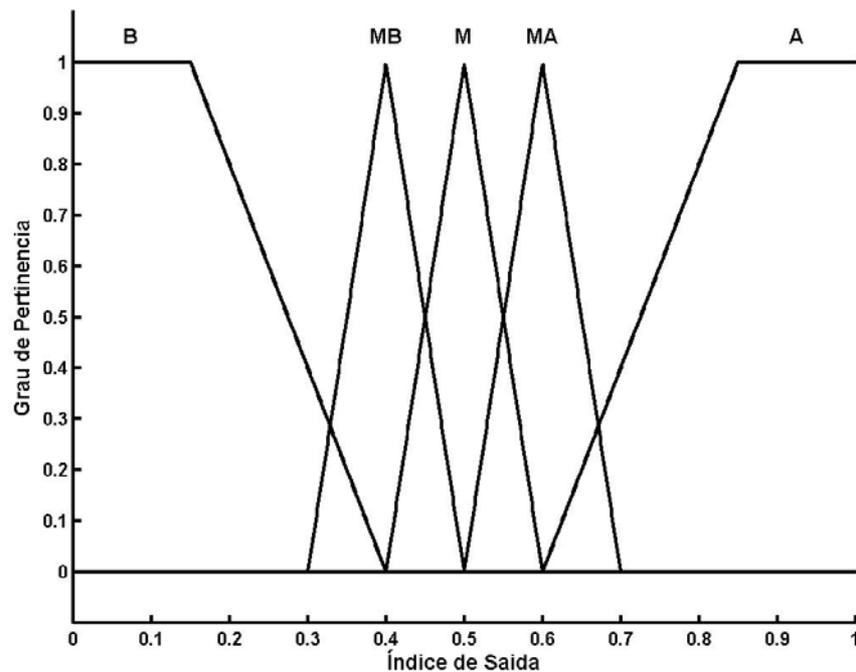


Figura 5.3 – Funções de pertinência para a variável: índice de saída.

Na Figura 5.4 é apresentado um gráfico 3D do índice de saída versus variáveis de entrada, conforme regras estabelecidas. A formação final do vetor de barras candidatas é feita simplesmente selecionando-se aquelas que tenham um índice de saída mínimo preestabelecido.

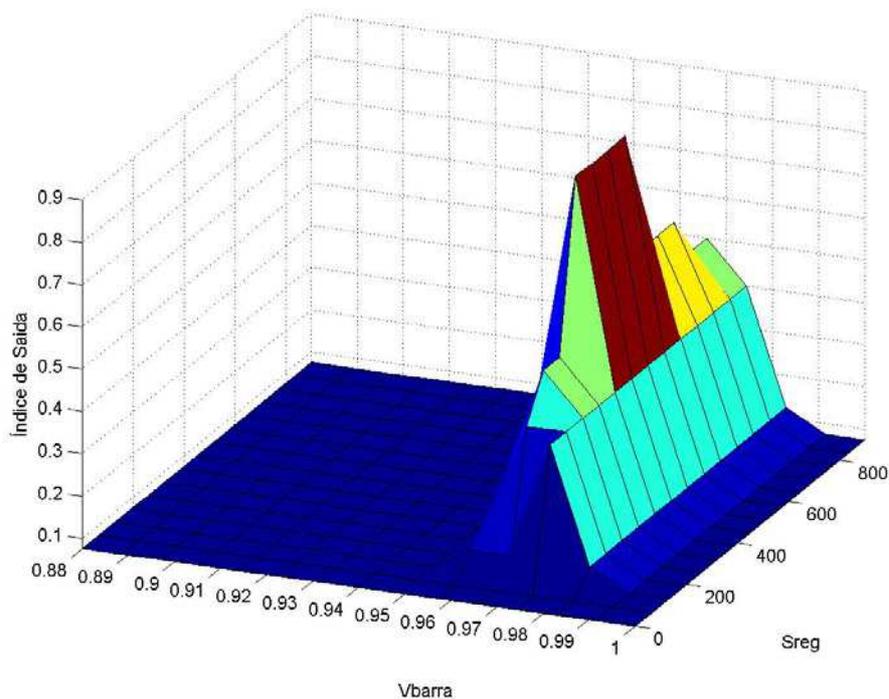


Figura 5.4 – Gráfico de Superfície das variáveis após a *defuzzificação*.

5.3.2 – Capacitores (*Análise de Sensibilidade*)

A redução do espaço de busca para capacitores é um teste realizado para analisar a sensibilidade de cada barra para receber módulos capacitivos. A sensibilidade é uma medida do quanto o alimentador como um todo é afetado em termos de melhoria na redução de perdas, correção de fator de potência e do perfil de tensão.

Uma quantidade excessiva de reativo capacitivo também provoca efeitos indesejáveis; tais como: aumento de perdas e elevação dos níveis de tensão acima do permitido.

Inicialmente, calculam-se os fluxos de carga sem equipamentos instalados para os três patamares da curva de duração de carga segmentada do alimentador. Em seguida, faz-se um diagnóstico inicial em termos das variáveis de entrada do sistema fuzzy: *redução de perdas, fator de potência total e nível médio de tensão* em p.u.

A variável de saída obtida para cada barra reflete a sensibilidade da barra para instalação de módulos capacitivos em relação às variáveis de entrada. A barra com um *índice de saída* acima de um valor mínimo estabelecido, será candidata a participar do processo de otimização para alocação dos capacitores.

Para obtenção do conjunto de barras candidatas, duas etapas são consideradas. Primeiro, testa-se a sensibilidade de cada barra individualmente. Isso significa colocar reativos capacitivos apenas em uma barra por vez. Com isso, obtém-se o primeiro subconjunto de barras candidatas (*sensibilidade individual* de cada barra).

Em seguida, a sensibilidade de cada barra é testada considerando a colocação de reativo capacitivo em mais outras n barras escolhidas aleatoriamente, além da própria barra. Obtém-se assim um segundo subconjunto de barras candidatas (*sensibilidade conjunta* de cada barra).

A operação de união (OR) entre estes dois subconjuntos fornece o conjunto de barras candidatas que participarão do processo de otimização.

Algumas considerações são feitas na obtenção da sensibilidade conjunta das barras. Considerou-se que a barra que está sendo testada (*barra t*) recebe uma quantidade de reativos capacitivos maior que as outras n barras de escolha aleatória.

Por exemplo, se considerado 600 kvar a ser colocado na *barra t* e 150 kvar em mais três barras escolhidas aleatoriamente, obtém-se um resultado da sensibilidade de 600 kvar alocados na *barra t* e 450 kvar nas outras três.

Devido à natureza estocástica na escolha das barras que recebem a quantidade menor de reativos, faz-se o teste de consistência da sensibilidade conjunta. Este consiste em obter o subconjunto durante r vezes, sendo que em cada vez é feita a operação de interseção (AND) entre o subconjunto atual e o da iteração anterior.

Com isso, uma barra fará parte do vetor de barras candidatas para sensibilidade conjunta somente se estiver presente em todas as r iterações. Define-se o vetor v_{bccc} como sendo o vetor de barras candidatas de capacitores para a sensibilidade conjunta.

Teste de Consistência

obtem v_{bccc}

$$v_{bccc_anterior} = v_{bccc}$$

faça teste de 1 (um) até r

obtem novo v_{bccc}

$$v_{bccc} = v_{bccc} \text{ AND } v_{bccc_anterior}$$

$$v_{bccc_anterior} = v_{bccc}$$

se teste é igual r , sai do laço e mostra v_{bccc} .

Apresentam-se seguir, para cada variável de entrada, as respectivas codificações em variáveis lingüísticas, conforme preceitos da lógica *fuzzy* e que refletem diretamente a aplicação do conhecimento especialista do problema. Em seguida, apresentam-se nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7, as definições das variáveis de entrada em termos de funções de pertinência (triangular e trapezoidal).

Redução de Perdas	Fator de Potência	Tensão de Barra
MuB – Muito Baixo	MuB – Muito Baixo	B – Baixo
B – Baixo	B – Baixo	MB – Médio Baixo
MB – Médio Baixo	MB – Médio Baixo	M – Médio
M – Médio	M – Médio	MA – Médio Alto
MA – Médio Alto	MA – Médio Alto	A - Alto
A – Alto	A – Alto	
MuA – Muito Alto	MuA – Muito Alto	

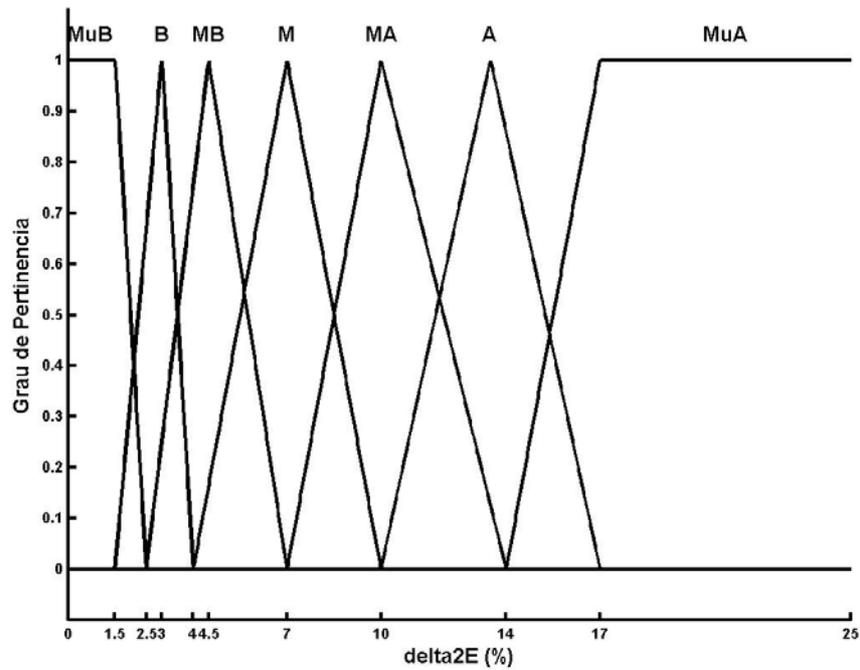


Figura 5.5 – Funções de pertinência para a variável de entrada: redução de perdas de energia.

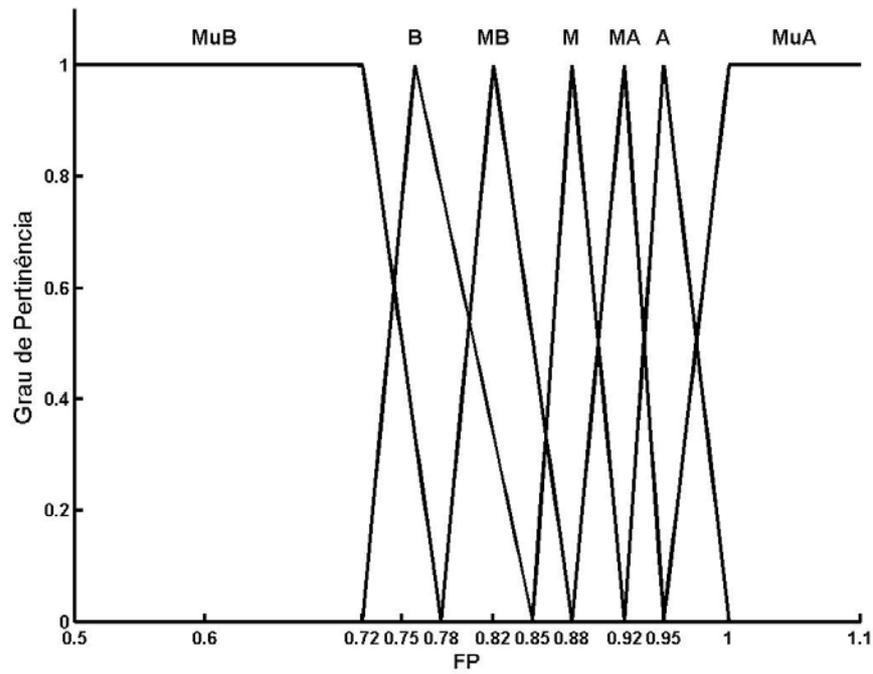


Figura 5.6 – Funções de pertinência para a variável de entrada: Fator de Potência.

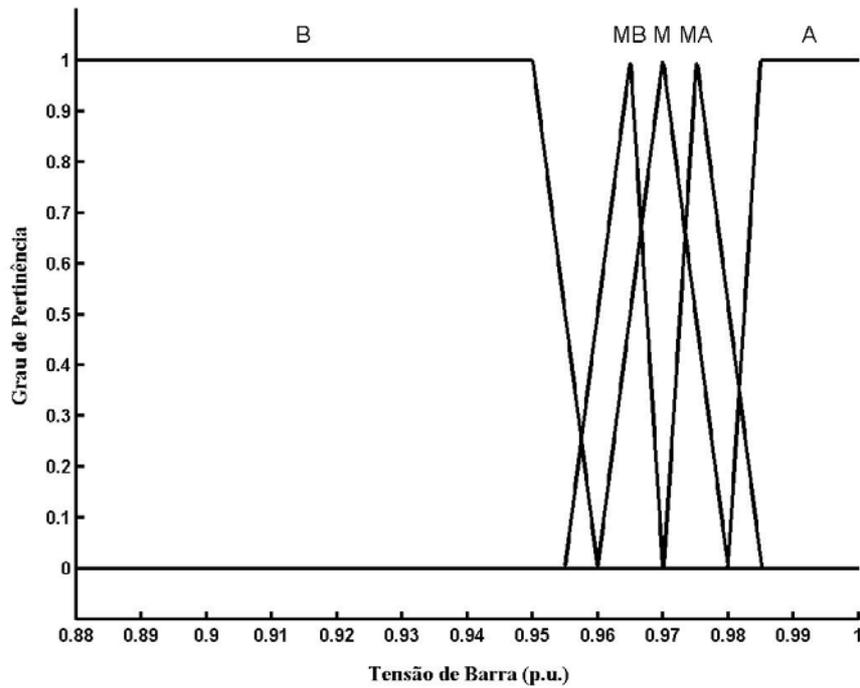


Figura 5.7 – Funções de pertinência para a variável de entrada: tensão de barra.

1. <i>Se</i> ($\Delta 2E$ é μ_B)	<i>então</i>	(Índice é B)
2. <i>Se</i> ($\Delta 2E$ é B)	<i>então</i>	(Índice é B)
3. <i>Se</i> ($\Delta 2E$ é MB)	<i>então</i>	(Índice é M)
4. <i>Se</i> ($\Delta 2E$ é MA)	<i>então</i>	(Índice é MA)
5. <i>Se</i> ($\Delta 2E$ é A)	<i>então</i>	(Índice é A)
6. <i>Se</i> ($\Delta 2E$ é μ_A)	<i>então</i>	(Índice é A)
7. <i>Se</i> (FP é μ_B)	<i>então</i>	(Índice é B)
8. <i>Se</i> (FP é B)	<i>então</i>	(Índice é MB)
9. <i>Se</i> (FP é A)	<i>então</i>	(Índice é M)
10. <i>Se</i> (FP é μ_A)	<i>então</i>	(Índice é B)
11. <i>Se</i> (V_{barra} é B)	<i>então</i>	(Índice é B)
12. <i>Se</i> (V_{barra} é A)	<i>então</i>	(Índice é A)
13. <i>Se</i> (V_{barra} é MB) e (FP é MB) e ($\Delta 2E$ é M)	<i>então</i>	(Índice é M) (1)
14. <i>Se</i> (V_{barra} é M) e (FP é MB) e ($\Delta 2E$ é M)	<i>então</i>	(Índice é M) (1)
15. <i>Se</i> (V_{barra} é MA) e (FP é MB) e ($\Delta 2E$ é M)	<i>então</i>	(Índice é M) (1)
16. <i>Se</i> (V_{barra} é MB) e (FP é M) e ($\Delta 2E$ é M)	<i>então</i>	(Índice é MA) (1)
17. <i>Se</i> (V_{barra} é M) e (FP é M) e ($\Delta 2E$ é M)	<i>então</i>	(Índice é MA) (1)
18. <i>Se</i> (V_{barra} é MA) e (FP é M) e ($\Delta 2E$ é M)	<i>então</i>	(Índice é MA)
19. <i>Se</i> (V_{barra} é MB) e (FP é MA) e ($\Delta 2E$ é M)	<i>então</i>	(Índice é A)
20. <i>Se</i> (V_{barra} é M) e (FP é MA) e ($\Delta 2E$ é M)	<i>então</i>	(Índice é A)
21. <i>Se</i> (V_{barra} é MA) e (FP é MA) e ($\Delta 2E$ é M)	<i>então</i>	(Índice é A)

De maneira semelhante ao que foi feito para reguladores de tensão, algumas regras exprimem a forma de inserir o conhecimento especialista do problema. Por exemplo, as regras de 1 a 12 indicam que, se pelo menos uma das variáveis de entrada tiver valores próximos dos limites superiores ou inferiores, a saída estará praticamente definida. Por outro lado, as regras de 13 a 21 indicam que valores intermediários das variáveis de entrada são compostos via operação AND para definir a saída.

A variável de saída expressa a aceitação que uma determinada barra terá para se instalar ou não os capacitores. Apresenta-se na Figura 5.8 sua representação gráfica.

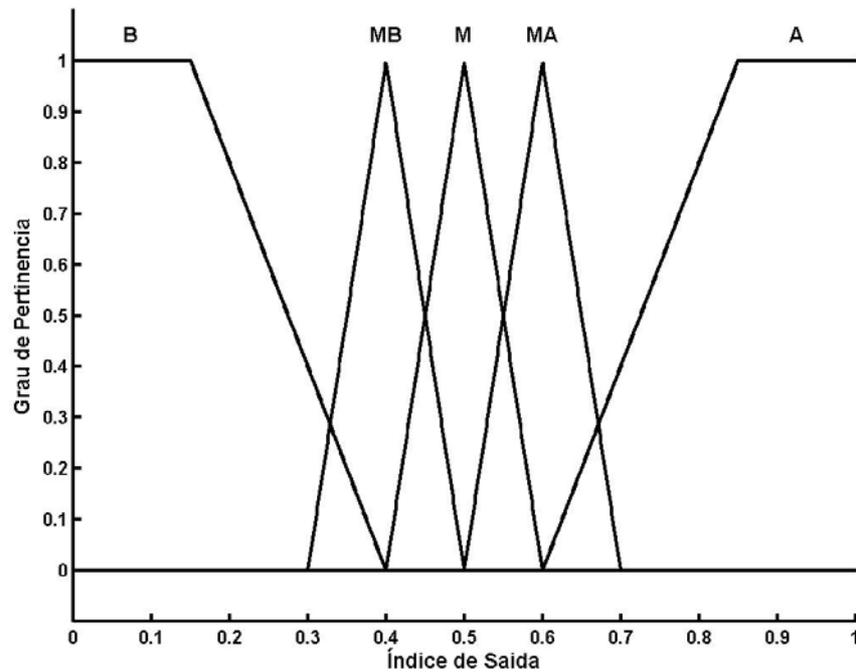


Figura 5.8 – Funções de pertinência para a variável: índice de saída.

5.4 Codificação

A codificação foi feita no sistema binário e adotou-se um cromossomo contendo duas partes principais: uma para o objetivo de compensação reativa e outra para o objetivo de correção do perfil de tensão. Apresenta-se na Figura 5.9, o cromossomo já decodificado para decimal e composto por duas partes. A primeira parte refere-se à alocação de capacitores e foi implementada conforme Ferreira et al (2002), enquanto que a segunda parte refere-se à localização e ajustes do regulador de tensão, implementado conforme Almeida (2008).

A primeira parte é subdividida ainda em quatro segmentos: o primeiro informa as barras onde serão instalados os capacitores. O segundo e terceiro segmentos informam os números de módulos capacitivos chaveados para as condições de carga de pico e carga intermediária, respectivamente. O quarto segmento da primeira parte informa o número de capacitores fixos.

Parte I Capacitores														Parte II Reguladores					
Barra				N° de Módulos capacitivos p/ carga de:										Barra	tap p/ carga de:				
				<i>p</i>				<i>i</i>			<i>l</i>				<i>p</i>	<i>i</i>	<i>l</i>		
39	51	57	22	0	1	2	0	1	0	1	3	3	3	2	3	3	9	6	3
1°				2°				3°			4°			1°	2°	3°	4°		

Figura 5.9 – Estrutura do cromossomo decodificado.

A segunda parte do cromossomo também é subdividida em quatro segmentos. O primeiro informa o endereço (n') do número da barra onde será instalado o banco de reguladores monofásico. Este endereço é a posição do elemento no vetor de barras candidatas, após a redução do espaço de busca para a alocação de reguladores. Os outros três segmentos da segunda parte informam os *taps* para as condições de carga de pico, intermediária e leve, respectivamente.

Analisando-se a Figura 5.9, observa-se, por exemplo, que a barra 57 teria dois capacitores chaveados em carga de pico, um capacitor chaveado para carga intermediária e dois capacitores fixos. É importante destacar que se o capacitor é do tipo fixo, obviamente este estará presente em todos os patamares de carga.

Apresenta-se na Figura 5.10 a estrutura do cromossomo decodificado para dois reguladores de tensão. Observa-se que estendeu-se a parte II da codificação mostrada na Figura 5.9.

Barra				N° de Módulos capacitivos p/ carga de:										Barra R_1	tap p/ carga de:			Barra R_2	tap p/ carga de:			
				<i>p</i>				<i>i</i>			<i>l</i>				<i>p</i>	<i>i</i>	<i>l</i>		<i>p</i>	<i>i</i>	<i>l</i>	
64	62	58	60	3	3	0	1	3	1	0	0	3	0	2	3	7	6	5	18	5	4	2

Figura 5.10 – Estrutura do cromossomo decodificado para dois reguladores de tensão.

A quantidade total de kvar instalado em cada barra é dada pela seguinte equação:

$$Q_i = - \left[\alpha_{if} \cdot (N_1 \cdot C_{fixo}) + \alpha_{ich} \cdot \sum_{p=2}^{npat} (N_p \cdot C_{chav}) \right] \quad (5.3)$$

sendo:

Q_i é o kvar instalado na barra i ;

α_{if} (α_{ich}) é o parâmetro que define o tipo de capacitor alocado na barra i , conforme apresentado na Tabela 5.1;

N_1 é o número de módulos de capacitores fixos;

N_p é o número de módulos de capacitores chaveados instalados no patamar p da curva de duração de carga segmentada;

C_{fixo} é o valor padronizado (kvar) de um módulo de capacitor fixo;

C_{chav} é o valor padronizado (kvar) de um módulo de capacitor chaveado;

$npat$ é o número de patamares da curva de duração de carga segmentada.

O sinal negativo da Equação (5.3) indica que se trata de uma quantidade de reativos capacitivos. Esta formulação para a decodificação é feita de modo que se pode escolher se as barras candidatas receberão módulos de capacitores fixos ou chaveados ou ambos, conforme parâmetro α_i mostrado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Escolha do tipo de capacitor a ser alocado na barra candidata.

Parâmetro α_i		Condição de alocação na barra i
α_{if}	α_{ich}	
0	0	Sem capacitores
0	1	Só chaveado
1	0	Só fixo
1	1	Fixo e chaveado

Para o caso de se ter: $n_{pat}=3$, $C_{fixo}=100$ kvar, $C_{chav}=50$ kvar e considerando-se, por exemplo, que na barra 57 (figura 5.9) serão alocados módulos fixos e chaveados ($\alpha_{if}=1$ e $\alpha_{ich}=1$), tem-se:

$$Q_{57} = -\left(1 \cdot (2 \cdot 100) + 1 \cdot \sum_{p=2}^3 (N_p \cdot 50)\right)$$

$$Q_{57} = -((2 \cdot 100) + (1 \cdot 50) + (2 \cdot 50)) = -(200 + 50 + 100)$$

$$Q_{57} = -350 \text{ k var.}$$

Apresentam-se nas Tabelas 5.2a e 5.2b, respectivamente, os números de módulos de capacitores e a potência reativa alocada nas barras, feitas para o cromossomo apresentado na Figura 5.9, conforme Equação (5.3).

Tabela 5.2 - Colocação de capacitores nas barras considerando: $C_{fixo}=100$ kvar e $C_{chav}=50$ kvar. (a) Quantidade e (b) kvar alocado, de acordo com o patamar de carga.

Barra	Nº de módulos p/ carga:		
	leve	int	Pico
39	3	1	0
51	3	0	1
57	2	1	2
22	3	3	0



Barra	kvar presente no patamar:		
	leve	int	pico
39	300	350	350
51	300	300	350
57	200	250	350
22	300	450	450

Para o regulador de tensão, o número n' , vindo do cromossomo decodificado, informa o endereço no vetor de barras candidatas (V_{bcr}), da barra que receberá o regulador. Assim,

$$B_r = V_{bcr}(n) \quad (5.4)$$

$$n = n' + 1$$

sendo:

B_r é a barra onde será alocado o regulador de tensão;

V_{bcr} é o vetor de barras candidatas para o regulador de tensão;

n' é o número vindo do cromossomo decodificado.

A soma de n' com 1 (um), se deve ao fato do número zero representar o primeiro elemento de V_{bcr} . Por exemplo, para um vetor V_{bcr} contendo os números de sete barras candidatas, $V_{bcr}=[4 \ 5 \ 8 \ 10 \ 12 \ 15 \ 22]$:

$$n'=0 \Rightarrow n=1. V_{bcr}(1)=4. \text{ Regulador instalado na barra 4.}$$

$$n'=4 \Rightarrow n=5. V_{bcr}(5)=12. \text{ Regulador instalado na barra 12.}$$

Caso apareça no cromossomo um número de endereço de barra maior que a dimensão do vetor de barras candidatas ($n > |V_{bcr}|$), faz-se uma rotação cíclica:

$$n_{rc} = n - |V_{bcr}| \quad (5.5)$$

sendo n_{rc} o novo endereço após a rotação cíclica.

Para o mesmo vetor V_{bcr} do exemplo anterior, caso um determinado cromossomo tenha, por exemplo, o número $n'=9 \Rightarrow n=10$. Como $|V_{bcr}|=7$, pois possui apenas sete elementos, com a rotação cíclica tem-se:

$$n_{rc} = 10 - 7 \Rightarrow n_{rc} = 3 \Rightarrow V_{bcr}(3) = 8.$$

Assim, o regulador seria instalado na barra 8. Desta forma, impede-se que se tenham cromossomos defeituosos, os quais representam soluções infactíveis.

Considerando a redução do espaço de busca para capacitores, realiza-se a decodificação do cromossomo de modo semelhante a que foi feita para reguladores de tensão, ou seja, o número n' indicado no cromossomo informa o endereço no vetor de barras candidatas (V_{bcc}), da barra que receberá os capacitores. Assim,

$$B_c = V_{bcc}(n) \quad (5.6)$$

$$n = n' + 1$$

sendo:

B_c é a barra onde serão alocados os capacitores;

V_{bcc} é o vetor de barras candidatas para receber os capacitores;

n' é o número vindo do cromossomo decodificado.

Caso apareça no cromossomo decodificado um número que exceda a dimensão do vetor de barras candidatas para capacitores ($n > |V_{bcc}|$), realiza-se a rotação cíclica de modo semelhante ao que foi feito para reguladores de tensão.

5.5 Funções Objetivo

As funções objetivo (f_1 e f_2) são formuladas de modo independente para resolver o problema do controle de tensão e reativos (volt/var) em alimentadores de distribuição. A função associada ao controle da potência reativa, f_1 , representa os custos das perdas e a função para o controle da tensão, f_2 , representa o desvio de tensão das barras para todos os patamares de carga. A função f_2 tem uma formulação baseada em termos de funções de pertinência de lógica *fuzzy*, utilizando uma função do tipo triangular.

5.5.1 – Função Objetivo de Capacitores (f_1)

A função objetivo de capacitores é formulada de modo a ser minimizada, sendo composta de três parcelas:

- Custos das perdas de potência em horário de pico;
- Custos das perdas de energia;
- Custo dos capacitores fixos e chaveados (aquisição, instalação e manutenção).

As duas primeiras parcelas indicam as quantias obtidas com a redução das perdas variáveis. A última parcela representa os custos de aquisição, instalação e manutenção dos capacitores. Portanto, a função a ser minimizada, informa o custo total obtido após a inserção dos módulos capacitivos através de uma solução ótima. Ao final, a função objetivo implementada é conforme equação abaixo:

$$f_1(c) = K_p \Delta p + K_E \Delta E + K_C(n_f, n_c, c_{inst}) \quad (5.7)$$

sendo:

f_1 → função objetivo a ser minimizada;

c → cromossomo;

K_p → custo médio anual de perda de potência de pico (\$/kW/ano);

Δ_p → perdas de potência em horário de pico (kW);

K_E → custo médio anual de perda de energia (\$/kWh);

Δ_E → perdas de energia (kWh);

K_C → custos de aquisição e instalação dos capacitores (\$);

O valor de K_p está relacionado com os custos que a concessionária teria para atender novos consumidores em horário de pico, investimentos na melhoria do sistema, amortização desses investimentos, etc. Este parâmetro varia bastante de uma concessionária para outra. Os valores pesquisados na literatura indicam K_p variando na faixa de 120 a 700 (\$/kW/ano), sendo mais frequentes os valores entre 150 e 300 (\$/kW/ano).

A variável K_E é o custo médio anual de perda de energia, contabilizada em período integral, sendo que a faixa de valores deste custo encontrado na literatura varia

entre 0,03 e 0,07 (\$/kWh). Os custos de aquisição e instalação dos capacitores são dados por K_C . A função K_C depende do número de capacitores fixos (n_f) e chaveados (n_c) a serem adquiridos e do custo de instalação associado (c_{inst}). Em geral, o custo dos capacitores é dado por unidade de potência reativa (\$/kvar), sendo que os capacitores chaveados apresentam maior custo de aquisição do que os fixos. O custo de instalação dos capacitores é um fator subjetivo e pode variar de concessionária para concessionária.

No algoritmo implementado, pode-se associar um custo diferente para cada ponto físico disponível para instalação de capacitores; ficando a critério de o usuário indicar o custo de instalação, o qual inclusive, pode ser nulo.

5.5.2 – Função Objetivo de Reguladores de Tensão (f_2)

A função objetivo dos reguladores utiliza uma função de pertinência de lógica *fuzzy* e reflete o critério técnico de minimizar o desvio de tensão nas barras do alimentador. A forma como esta função é utilizada para se obter o desvio médio de tensão das barras do alimentador é mostrada na Equação (5.8):

$$f_2(c) = \frac{1}{npat} \sum_{p=1}^{npat} \left(\frac{1}{nb} \sum_{i=1}^{nb} (1 - \mu(v_i)) \right) \quad (5.8)$$

sendo:

$$\mu(v_i) = \begin{cases} 0 & se \ v_i \leq v_{\min} \\ \frac{v_i - v_{\min}}{v_r - v_{\min}} & se \ v_{\min} < v_i \leq v_r \\ \frac{v_{\max} - v_i}{v_{\max} - v_r} & se \ v_r < v_i \leq v_{\max} \\ 0 & se \ v_i \geq v_{\max} \end{cases} \quad (5.9)$$

f_2 → função objetivo a ser minimizada;

c → cromossomo;

$npat$ → número de patamares da curva de duração de carga segmentada;

nb → número de barras do alimentador completo;

μ → função de pertinência triangular;

v_i → tensão da barra i em p.u.;

v_{\min}, v_r, v_{\max} → níveis de tensão: mínimo (0.95 p.u), de referência (1.0 p.u) e máximo (1.05 p.u).

Apresenta-se na Figura 5.11 o gráfico da função de pertinência triangular (μ), cujos limites são justamente os níveis de tensão: mínimo, de referência e máximo.

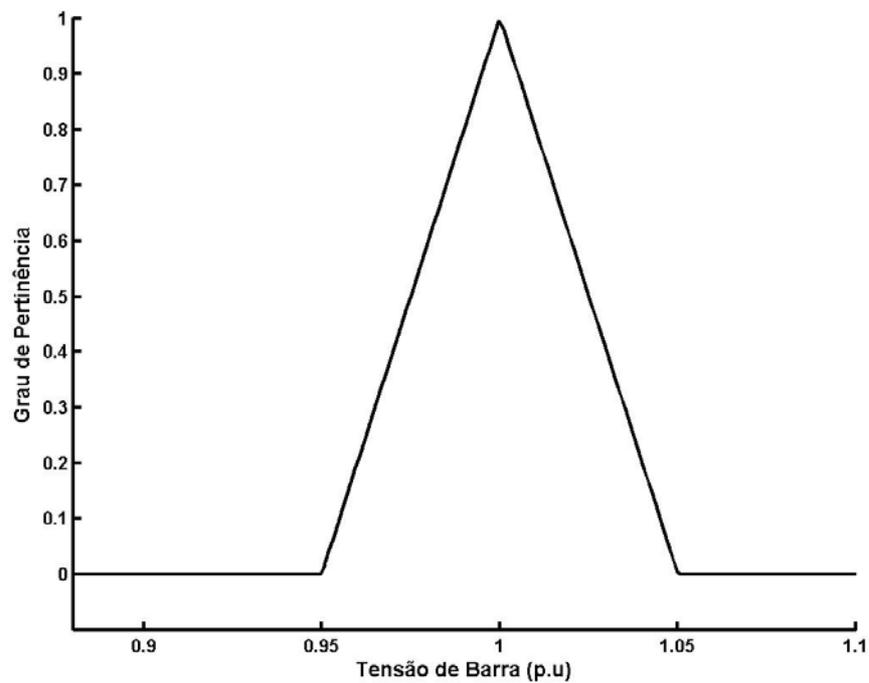


Figura 5.11 – Função de pertinência *fuzzy* que compõe a função objetivo de regulador de tensão.

5.6 Formulação para Otimização Multiobjetivo

De acordo com as definições para otimização multiobjetivo apresentados na seção 3.1, bem como das definições de cada objetivo representadas pelas funções objetivo f_1 e f_2 , formuladas na seção 5.5, apresenta-se a seguir a formulação para o problema de otimização combinatória multiobjetivo com dois objetivos:

Minimizar:

$$z = f(x) = (f_1(x), f_2(x)) \quad (5.10)$$

Sujeito a:

$$g(x) = (g_1(x), g_2(x)) \leq b \quad (5.11)$$

em que:

$$\begin{aligned} x &= (x_1, x_2) \in X^* \\ z &= (z_1, z_2) \in Z^* \end{aligned}$$

O vetor objetivo é composto por f_1 e f_2 , resultados calculados das funções objetivo dos capacitores e reguladores de tensão, respectivamente. O vetor decisão $x = (x_1, x_2) \in X^*$ representa uma possível solução para instalação de capacitores fixos e chaveados (x_1) mais o banco de reguladores de tensão (x_2), conforme codificação do cromossomo apresentada na seção 5.4.

Assim, x_1 representa as variáveis de decisão da parte de capacitores (parte I do cromossomo) e x_2 representa as variáveis de decisão da parte de reguladores (parte II do cromossomo). As restrições do problema são:

$$b = (N_{mm}, \Delta_{vp}) \quad (5.12)$$

$$g_1(x) = N_m$$

$$g_2(x) = \Delta_{vm}$$

sendo:

1. N_{mm} é o número máximo de módulos capacitivos;
2. Δ_{vp} é o máximo desvio de tensão de barra permitido;
3. N_m é o número de módulos capacitivos para uma dada solução;
4. Δ_{vm} é o máximo desvio de tensão de barra ocorrido no alimentador, para uma dada solução.

De acordo com o apresentado na seção 3.1: $X^* = \{x \in X : g(x) \leq b\}$ é o conjunto das soluções factíveis.

5.7 Algoritmo Proposto

Apresenta-se na Figura 5.12 um esquema simplificado do algoritmo proposto do método apresentado nesta tese. É importante destacar que a lógica *fuzzy* é aplicada na redução do espaço de busca de cada problema em particular, partindo das condições iniciais e sem equipamentos instalados, antes de dar início ao método de otimização multiobjetivo SPEA2.

O SPEA2 é iniciado considerando os vetores de barras candidatas tanto de capacitores quanto de reguladores de tensão. O número de bancos de reguladores de tensão é um parâmetro de entrada, assim como a máxima quantidade de barras que receberão módulos capacitivos.

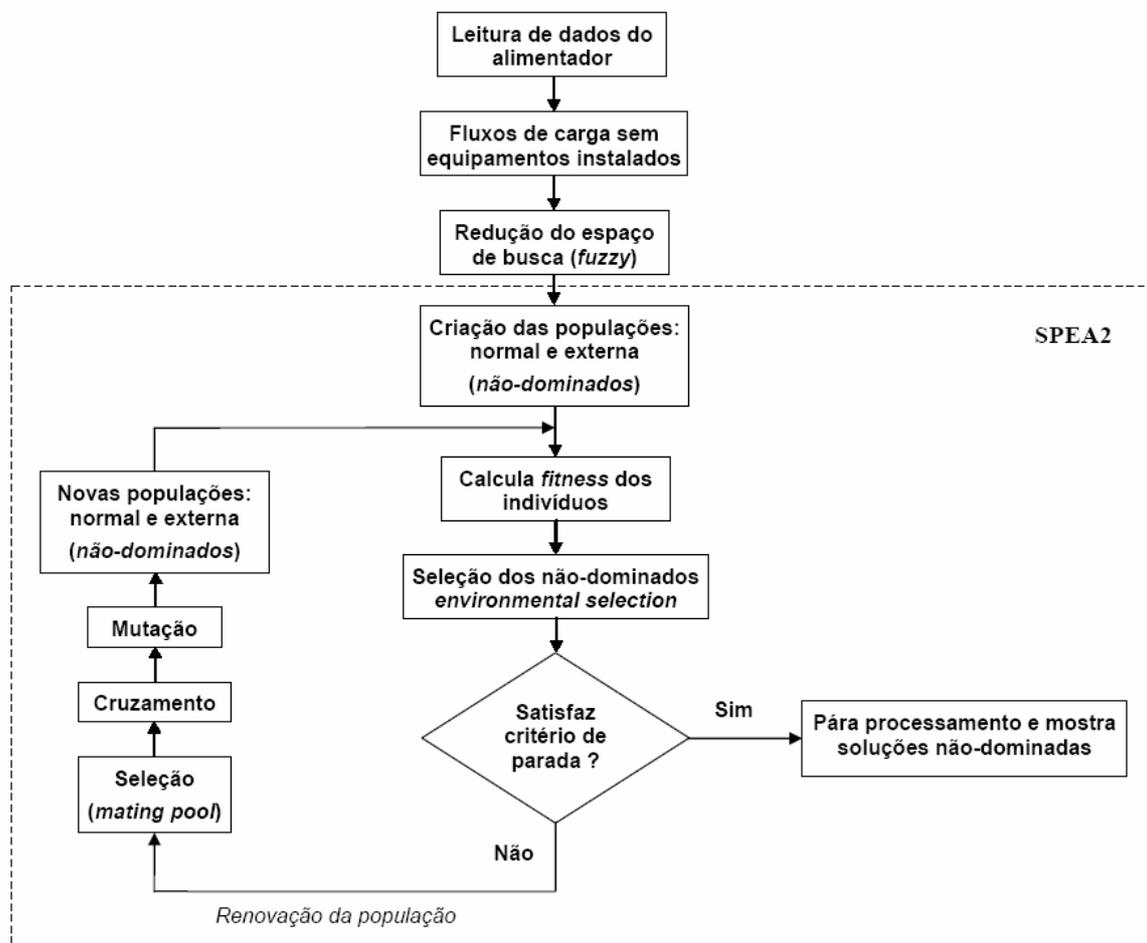


Figura 5.12 – Esquema simplificado do algoritmo proposto.

Capítulo 6

Estudo de Casos e Análise dos Resultados

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos para o planejamento integrado de bancos de capacitores, fixos e chaveados, bem como de um banco de reguladores monofásicos, ligados em delta fechado. São apresentados os resultados do método proposto para dois alimentadores: primeiro para um alimentador de 69 barras conhecido da literatura (Baran & Wu, 1989) e em seguida para um sistema real, o alimentador CZA03 da CEAL – Companhia Energética de Alagoas. Os dados dos alimentadores encontram-se no Apêndice A.

6.1 Condições Iniciais e Parâmetros de Entrada

A primeira parte da implementação, para cada alimentador consistiu em executar o fluxo de carga (Das et al, 1995) para cada um dos três patamares de carga, obtendo-se as perdas totais de energia. Da condição mais severa, foram calculadas: as perdas de potência, os fluxos nos trechos e as tensões das barras. Em seguida determinou-se o tronco (caminho de maior fluxo), extraindo-se assim o diagnóstico do alimentador sem equipamentos instalados.

Apresentam-se na Tabela 6.1 as condições iniciais de perdas de energia para cada um dos alimentadores, em que o método foi aplicado.

Tabela 6.1 - Perdas anuais de energia antes dos equipamentos instalados.

Alimentador	MWh	% do total
69 barras	1107,12	4,39
167 barras	1453,5	4,79

Para o objetivo da compensação reativa, função f_1 (equação 5.7), Os parâmetros utilizados foram:

- $K_p = \$180,00 / kW / ano$
- $K_E = \$0,04 / kWh$
- $K_{C(switched\ unit)} = \$240,00$
- $K_{C(fixed\ unit)} = \$200,00$

Os valores destes parâmetros estão dentro da faixa utilizada nos trabalhos correlatos encontrados na literatura.

Os parâmetros utilizados para o SPEA2 são apresentados na Tabela 6.2. O critério de parada foi o limite de 3000 gerações. As restrições do problema bi-objetivo, conforme seção 5.6, foram: $N_{md} = 30$ e $\Delta_{vm} = 0.05 pu$.

Tabela 6.2 – Parâmetros do SPEA2.

População	Indivíduos <i>não-dominados</i>	Taxas de	
		crossover	mutação
72	18	60 %	2 %

As condições iniciais do perfil de tensão ao longo do tronco de cada alimentador, juntamente com os respectivos perfis de tensão após a implementação (para uma solução *não-dominada*), são mostradas nos gráficos da seção seguinte.

6.2 Resultados Preliminares

O método proposto foi aplicado a um alimentador de 69 barras, tensão nominal de 12,66 kV, cuja codificação do cromossomo foi feita para instalação de um banco de reguladores em uma barra e capacitores em quatro barras diferentes. Em seguida, aplicado a um alimentador de 167 barras, tensão nominal de 13,8 kV, cuja codificação do cromossomo foi para a instalação de dois bancos de reguladores de tensão e capacitores, sendo que para o objetivo da compensação reativa, foram considerados módulos capacitivos fixos de 200 kvar e chaveados de 100 kvar.

6.2.1 – Alimentador 01: 69 Barras

Este é um alimentador radial (figura 6.1) conhecido da literatura, utilizado por Baran & Wu (1989) para alocação de capacitores em redes de distribuição. O tronco é o caminho compreendido entre a barra da subestação e a barra 54. Na Tabela 6.3 são apresentados os dados da curva de duração de carga deste alimentador.

Tabela 6.3 - Fatores de carregamento e duração anual dos patamares de carga (Baran & Wu, 1989).

Patamar	1 - pico	2 - intermediário	3 - leve
Fator de Carregamento	1,8	1,0	0,50
Duração (h)	1000	6760	1000

Na condição de carga de pico, foram determinadas as variáveis de entrada: *tensão de barra e potência do regulador*, para redução do espaço de busca obtida através da lógica *fuzzy*, conforme formulação feita na seção 5.3.1.

Considerando um *índice de saída* mínimo de valor igual a 0,4, o vetor de barras candidatas, V_{bcr} , obtido para alocação de reguladores de tensão foi:

$$V_{bcr} = [5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 42]$$

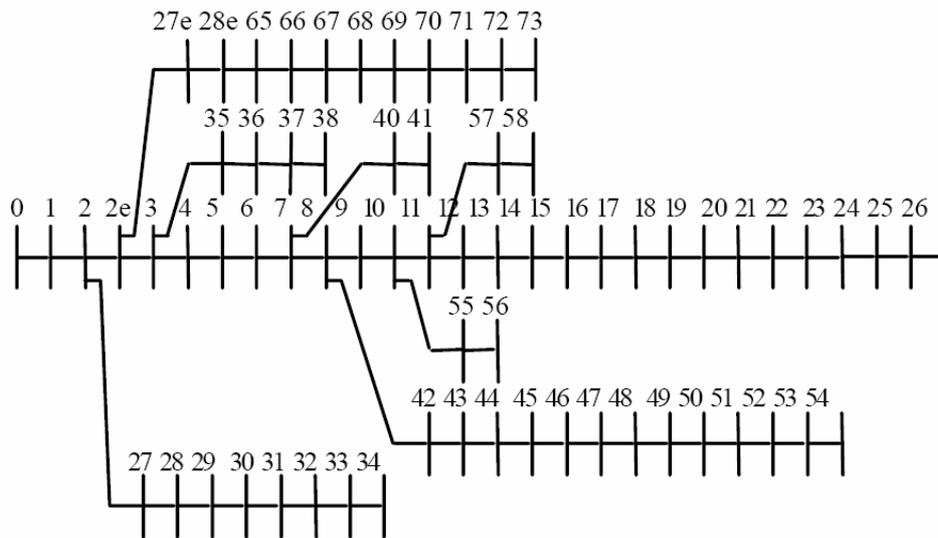


Figura 6.1 – Alimentador radial de 69 barras (Baran & Wu, 1989).

O vetor de barras candidatas de apenas cinco elementos ($|V_{bcr}| = 5$) para um alimentador de 69 barras, representa uma redução significativa do espaço de busca (cerca de 92,75%). Observa-se também que estas barras pertencem ao tronco do alimentador.

Uma das soluções *não-dominadas* presentes no arquivo (grupo dos *não-dominados*) após a convergência do algoritmo é apresentada na Figura 6.2. Para esta solução, traçou-se o perfil de tensão das barras do tronco do alimentador, apresentada na Figura 6.3, antes e depois da instalação dos equipamentos, na a condição de carga de pico.

Barra	N° de Módulos capacitivos p/ carga de:												Barra	tap p/ carga de:					
	<i>p</i>			<i>i</i>			<i>l</i>			<i>p</i>	<i>i</i>	<i>l</i>							
64	62	58	60	3	3	0	1	3	1	0	0	3	0	2	2	3	5	3	1

Figura 6.2 – Cromossomo presente no arquivo após a convergência do SPEA2 (Alimentador 01).

Todas as barras apresentam nível de tensão dentro do permitido, atendendo a restrição de tensão. O regulador foi instalado na barra 8 (quarta barra do vetor V_{bcr}) e a potência calculada foi aproximada para o limite superior padronizado mais próximo, cujo valor foi de 276 kVA.

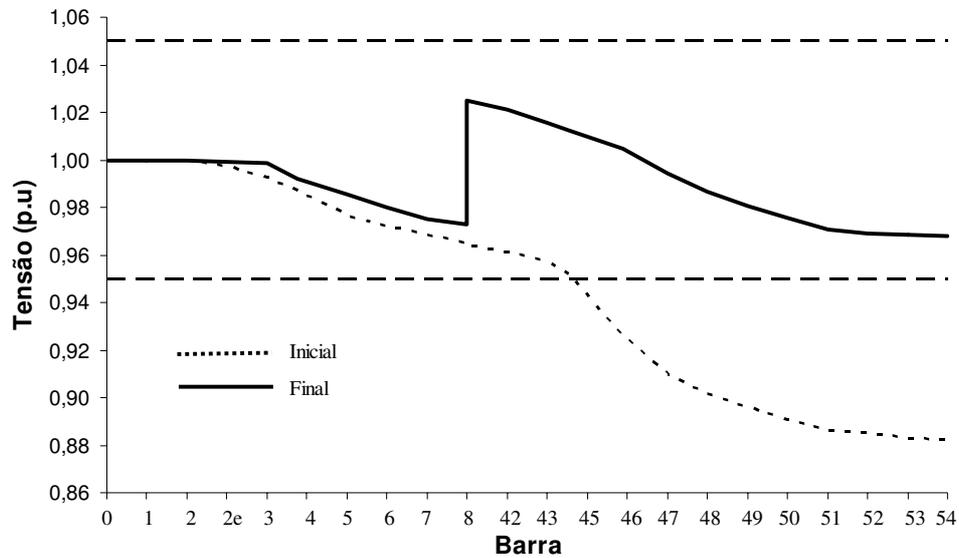


Figura 6.3 – Perfis de tensão do tronco para a condição de carga de pico (Alimentador 01).

As soluções *não-dominadas*, no espaço objetivo, são apresentadas na Figura 6.4. Estas apresentam boa diversidade e têm distribuição de acordo com a fronteira de Pareto para o problema bi-objetivo do controle integrado de tensão e reativo (volt/var).

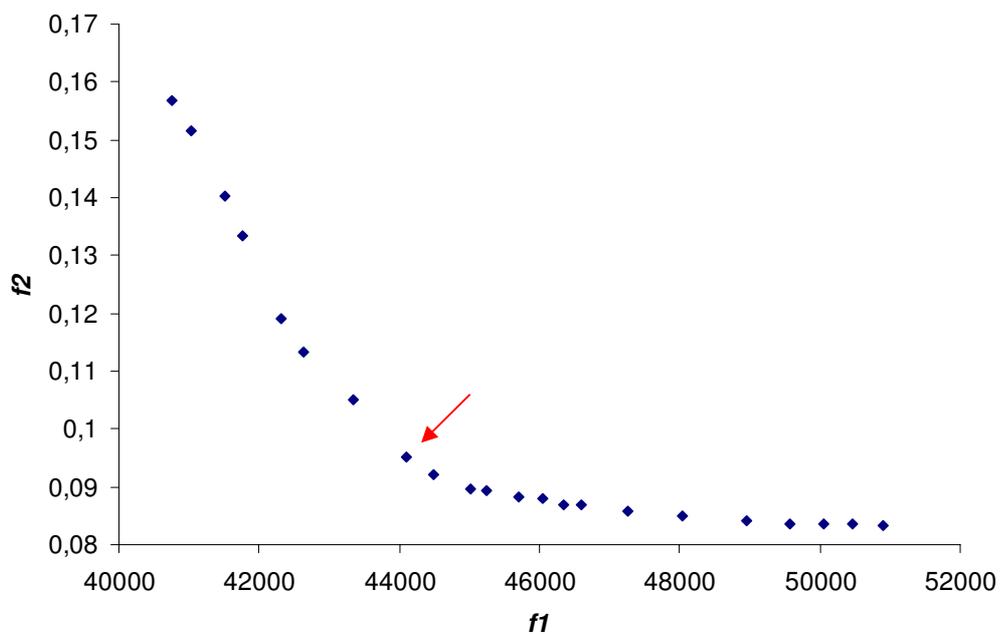


Figura 6.4 – Soluções no espaço objetivo para o controle integrado (volt/var) do alimentador 01: aproximação da fronteira de Pareto.

6.2.2 – Alimentador 02: 167 Barras

Este alimentador faz parte da rede de distribuição da Companhia Energética de Alagoas (CZA03-CEAL). A curva de carga foi segmentada em três patamares, através da rotina desenvolvida por Ferreira et al (2002), em que se utilizou um algoritmo genético para realizar a segmentação ótima da curva de duração de carga em um número de patamares desejado. Apresentam-se na Tabela 6.4 os dados da segmentação obtida.

Tabela 6.4 - Fatores de carregamento e duração anual dos patamares de carga (CZA03-CEAL).

Patamar	1 - pico	2 - intermediário	3 - leve
Fator de Carregamento	0,67	0,52	0,43
Duração (h)	2128	3650	2982

Considerando um *índice de saída* mínimo de valor igual a 0,4, o vetor de barras candidatas, V_{bcr1} , obtido para a alocação do primeiro regulador foi:

$$V_{bcr1} = [14 \ 15 \ 18 \ 19 \ 42 \ 44 \ 45 \ 46]$$

Para o segundo banco de reguladores de tensão, as barras candidatas foram obtidas do tronco do alimentador, considerando as barras do tronco a jusante da última barra candidata do primeiro regulador até o final do tronco. Desta forma, o vetor de barras candidatas para o segundo banco de reguladores de tensão é:

$$V_{bcr2} = [84 \ 86 \ 87 \ 88 \ 102 \ 104 \ 109 \ 110 \ 113 \ 116 \ 117 \ 118 \ 121 \ 124 \ 125 \ 127 \\ 128 \ 134 \ 150 \ 152 \ 153 \ 156 \ 157 \ 158 \ 159 \ 161 \ 162 \ 163 \ 164 \ 165]$$

Como o vetor de barras candidatas do primeiro banco tem apenas oito barras ($|V_{bcr1}| = 8$), a redução de espaço de busca foi de 95,21%. Para o segundo banco ($|V_{bcr2}| = 31$), a redução foi de 81,44%.

Uma das soluções *não-dominadas* presentes no arquivo após a convergência do algoritmo é apresentada na Figura 6.5. Para esta solução foi traçado o perfil de tensão das barras do tronco do alimentador, apresentada na Figura 6.6, antes e depois da instalação dos equipamentos, para a condição de carga de pico.

Barra	N° de Módulos capacitivos p/ carga de:															Barra R ₁	tap p/ carga de:			Barra R ₂	tap p/ carga de:						
	p					i					l						p	i	l		p	i	l				
156	134	84	63	32	0	1	2	0	1	1	0	1	2	2	3	2	1	2	3	0	5	4	2	4	6	3	2

Figura 6.5 – Cromossomo p/ 02 reguladores, presente no arquivo após a convergência do SPEA2 (Alimentador 02).

Todas as barras apresentam nível de tensão dentro do permitido, atendendo a restrição de tensão. O primeiro regulador foi instalado na barra 14 (primeira barra do vetor V_{bcr1}) e a potência calculada foi de 414 kVA. O segundo regulador foi instalado na barra 102, (quinta barra do vetor V_{bcr2}) e a potência calculada foi de 207 kVA.

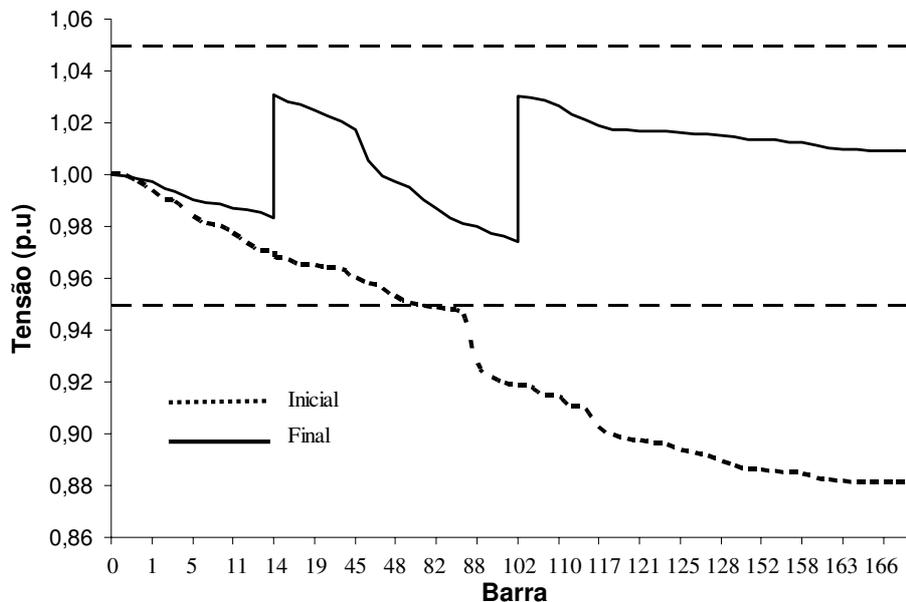


Figura 6.6 – Perfis de tensão do tronco para a condição de carga de pico (Alimentador 02).

As soluções *não-dominadas*, no espaço objetivo, são apresentadas na Figura 6.7. As soluções apresentam boa diversidade e representam uma boa aproximação fronteira de Pareto para o problema bi-objetivo do controle integrado de tensão e reativo (volt/var).

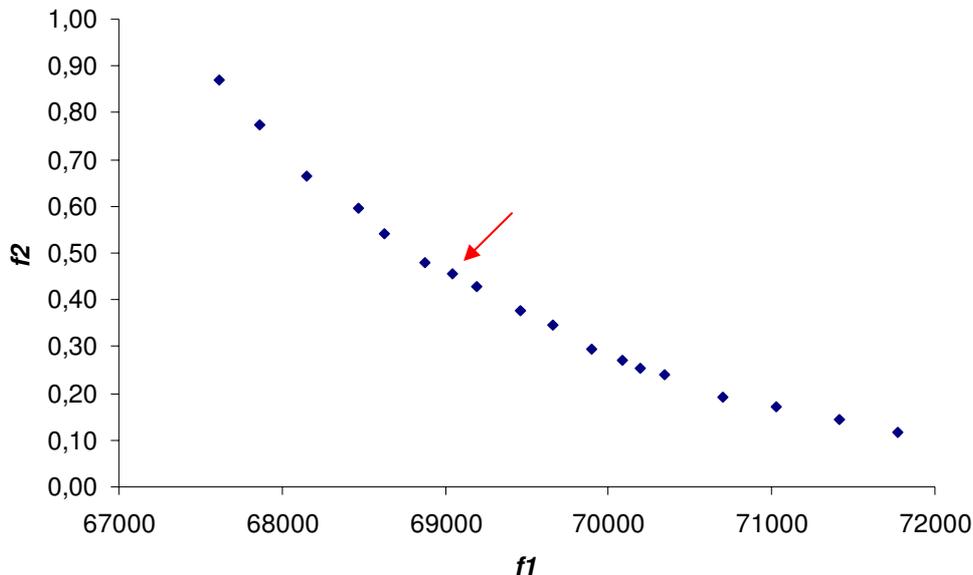


Figura 6.7 – Soluções no espaço objetivo para o controle integrado (volt/var) do alimentador 02: aproximação da fronteira de Pareto.

Apresentam-se na Tabela 6.5, a redução das perdas de energia para a solução *não-dominada* referente à Figura 6.2 (alimentador 01) e também para a Figura 6.5 (alimentador 02). Em ambos os casos, ocorreu uma significativa redução de perdas em relação à condição original apresentada na Tabela 6.1.

Tabela 6.5 - Perdas anuais de energia para uma das soluções *não-dominadas* apresentadas no arquivo.

Alimentador		MWh	Redução de perdas
69 barras	inicial	1107,12	19,36 %
	final	892,8	
167 barras	inicial	1453,5	33,87 %
	final	961,1	

6.3 Análise de Sensibilidade para Capacitores

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para a redução do espaço de busca para capacitores para o alimentador real de 167 barras. A execução dos fluxos de carga nos três patamares da curva de duração de carga segmentada revelou o seguinte diagnóstico:

$$Q_{total} = 2,7632 \text{ Mvar em horário de pico;}$$

$$\Delta^2 E = 1453,12 \text{ MWh (4,79\%) anuais;}$$

$$F.P = 0,85 \text{ (indutivo)}$$

$$v_{min} = 0,881 \text{ p.u}$$

Conforme formulado na seção 5.3.2, o conjunto de barras candidatas é obtido através da operação de união (OR) entre dois subconjuntos e estabelecido em cada caso um número mínimo para o *índice de saída* do sistema *fuzzy*, conforme funções de pertinência definidas para esta variável e apresentadas na Figura 5.8.

O primeiro subconjunto é o resultado da sensibilidade individual de cada barra. Para este caso, aplicou-se uma potência reativa de 600 kvar por barra testada (*barra t*) e estabeleceu-se um valor mínimo igual a 0,4 para o *índice de saída* do sistema *fuzzy*. Feito isso, obteve-se o vetor de barras candidatas de capacitores para a sensibilidade individual, v_{bcci} :

$$v_{bcci} = [117 \ 118 \ 121 \ 124 \ 125 \ 126 \ 127 \ 128 \ 129 \ 134 \ 135 \ 136 \\ 137 \ 150 \ 151 \ 152 \ 153 \ 156 \ 157 \ 158 \ 159 \ 161 \ 162]$$

Como o vetor de barras candidatas de capacitores para a sensibilidade individual tem apenas 28 elementos ($|V_{bcc_i}|=28$) em relação as 167 barras totais, percebe-se que a sensibilidade individual foi bastante restritiva.

O segundo subconjunto é o resultado da sensibilidade conjunta de cada barra. Para cada barra testada (*barra t*), foram aplicados 600 kvar. Ao mesmo tempo, outras três ($n = 3$) diferentes barras escolhidas aleatoriamente receberam 100 kvar, cada.

Estabeleceu-se um valor mínimo igual a 0,6 para o *índice de saída* do sistema *fuzzy*, obteve-se o vetor de barras candidatas de capacitores para a sensibilidade conjunta, v_{bcc} , após o teste de consistência que foi realizado 30 vezes ($r = 30$), de acordo com a seção 5.3.2.

$$v_{bcc} = [3 \ 4 \ 5 \ 7 \ 12 \ 14 \ 16 \ 18 \ 21 \ 22 \ 23 \ 24 \ 28 \ 29 \ 31 \ 33 \ 35 \ 41 \ 42 \ 43 \ 45 \ 48 \ 50 \\ 52 \ 53 \ 56 \ 60 \ 61 \ 62 \ 63 \ 65 \ 67 \ 72 \ 74 \ 75 \ 76 \ 78 \ 81 \ 84 \ 86 \ 87 \ 88 \ 89 \ 90 \ 91 \\ 92 \ 94 \ 97 \ 101 \ 104 \ 105 \ 106 \ 107 \ 108 \ 109 \ 110 \ 111 \ 113 \ 115 \ 117 \ 120 \ 122 \ 124 \\ 126 \ 127 \ 128 \ 130 \ 131 \ 132 \ 134 \ 136 \ 140 \ 141 \ 142 \ 143 \ 145 \ 148 \ 149 \ 150 \ 151 \ 152 \\ 153 \ 154 \ 155 \ 156 \ 157 \ 160 \ 162 \ 163 \ 166 \ 167]$$

O vetor final de barras candidatas V_{bcc} , conforme já mencionado é a operação de união (OR) entre os dois subconjuntos mencionados. Assim,

$$v_{bcc} = [3 \ 4 \ 5 \ 7 \ 12 \ 14 \ 16 \ 18 \ 21 \ 22 \ 23 \ 24 \ 28 \ 29 \ 33 \ 32 \ 35 \ 41 \ 42 \ 43 \ 45 \ 48 \ 50 \\ 52 \ 53 \ 56 \ 60 \ 61 \ 62 \ 63 \ 65 \ 67 \ 72 \ 74 \ 75 \ 76 \ 78 \ 81 \ 84 \ 86 \ 87 \ 88 \ 89 \ 90 \ 91 \\ 92 \ 94 \ 97 \ 101 \ 104 \ 105 \ 106 \ 107 \ 108 \ 109 \ 110 \ 111 \ 113 \ 115 \ 117 \ 118 \ 120 \\ 121 \ 122 \ 124 \ 125 \ 126 \ 127 \ 128 \ 129 \ 130 \ 131 \ 132 \ 134 \ 135 \ 136 \ 137 \ 140 \\ 141 \ 142 \ 143 \ 145 \ 148 \ 149 \ 150 \ 151 \ 152 \ 153 \ 154 \ 155 \ 156 \ 157 \ 158 \\ 159 \ 160 \ 161 \ 162 \ 163 \ 164 \ 165 \ 166 \ 167]$$

Como o vetor de barras candidatas de capacitores tem 102 elementos ($|V_{bcc}|=102$) em relação as 167 barras totais, obteve-se uma redução de espaço de busca de 38,92%.

6.4 Análise Individual

Nesta seção são apresentados os resultados considerando a alocação de apenas um tipo de equipamento por vez, ou seja, verificou-se a resposta do algoritmo, para resolver o problema volt/var, instalando somente capacitores e depois somente reguladores.

6.4.1 – Apenas Capacitores

A análise foi feita para o alimentador de 167 barras, considerando a redução de espaço de busca para capacitores. Assim os números que aparecem para as barras são na verdade o endereço das mesmas no vetor de barras candidatas para capacitores (v_{bcc}).

Apresenta-se na Figura 6.8 um cromossomo presente no grupo de soluções *não-dominadas* (arquivo). Esta solução também está destacada na Figura 6.10, quando são apresentadas no espaço objetivo.

Barra	Nº de Módulos capacitivos p/ carga de:														
	<i>p</i>				<i>i</i>				<i>l</i>						
6	90	44	15	1	0	0	0	1	0	2	1	2	3	2	3

Figura 6.8 – Cromossomo presente no arquivo após a convergência do SPEA2 considerando apenas alocação de capacitores (Alimentador 02).

A decodificação do cromossomo foi realizada considerando a colocação de capacitores fixos e chaveados nas barras. Assim, de acordo com a Equação 5.3: $\alpha_{if} = \alpha_{if} = 1$, sendo os módulos capacitivos fixos de 200 kvar e os módulos chaveados de 100 kvar. A decodificação do cromossomo da Figura 6.8 é apresentada na Tabela 6.6.

Apresentam-se na Figura 6.9, os perfis de tensão do tronco do alimentador 02 para esta mesma solução. Observa-se que a compensação reativa contribui consideravelmente para manter as tensões de barra dentro da faixa admissível. Entretanto, nas últimas barras a tensão já se encontra próxima do limite mínimo e que provavelmente irá diminuir ainda mais quando ocorrer um incremento de carga.

Tabela 6.6 – Decodificação do cromossomo – Somente Capacitores.
(a) Quantidade e (b) kvar alocado, de acordo com o patamar de carga.

Barra	Nº de módulos p/ carga:		
	leve	int	Pico
16	2	1	1
105	3	0	0
91	2	2	0
33	3	1	0

Barra	kvar presente no patamar:		
	leve	int	pico
16	400	500	600
105	600	600	600
91	400	600	600
33	600	700	700

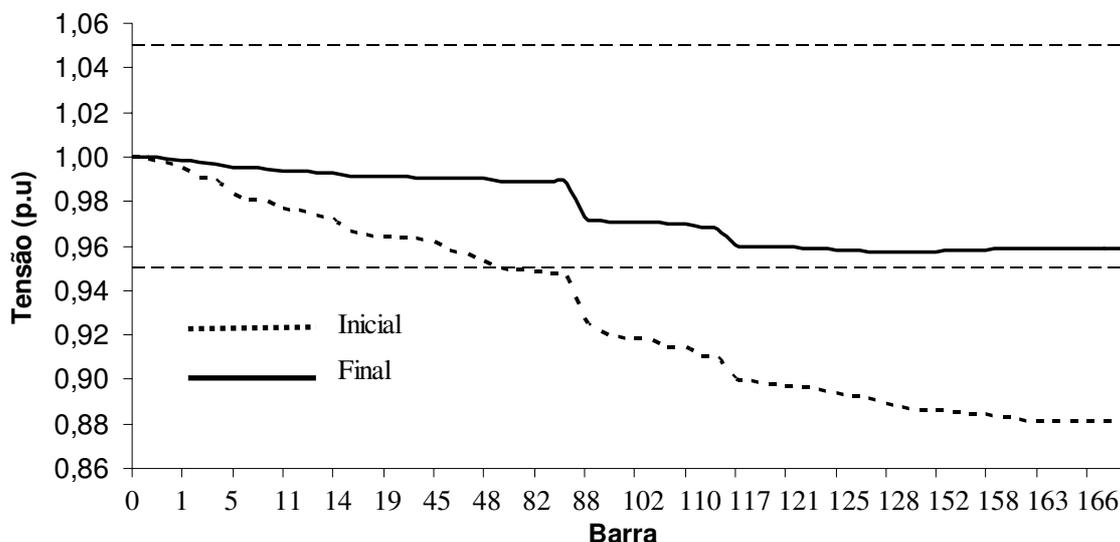


Figura 6.9 – Perfis de tensão do tronco para a condição de carga de pico (Alimentador 02), considerando apenas alocação de capacitores.

Para esta mesma solução, a redução das perdas anuais de energia e o Fator de Potência final, proveniente da compensação reativa estão apresentadas na Tabela 6.7.

A tensão mínima do tronco do alimentador foi de 0,9571 p.u. Entretanto, algumas barras tiveram tensão mínima próximo de 0,94 p.u. As perdas totais anuais de energia diminuiram de 4,79% para 3,50 %.

Tabela 6.7 - Perdas anuais de energia e Fator de Potência total para uma das soluções não-dominadas presentes no arquivo (somente capacitores).

Condição		F.P	MWh	Redução de perdas
167 barras	inicial	0,85	1453,5	38,65 %
	final	0,96	1048,29	

A distribuição no espaço objetivo, das soluções presentes no grupo dos *não-dominados* é apresentada na Figura 6.10, onde também é indicada a solução da Figura 6.8.

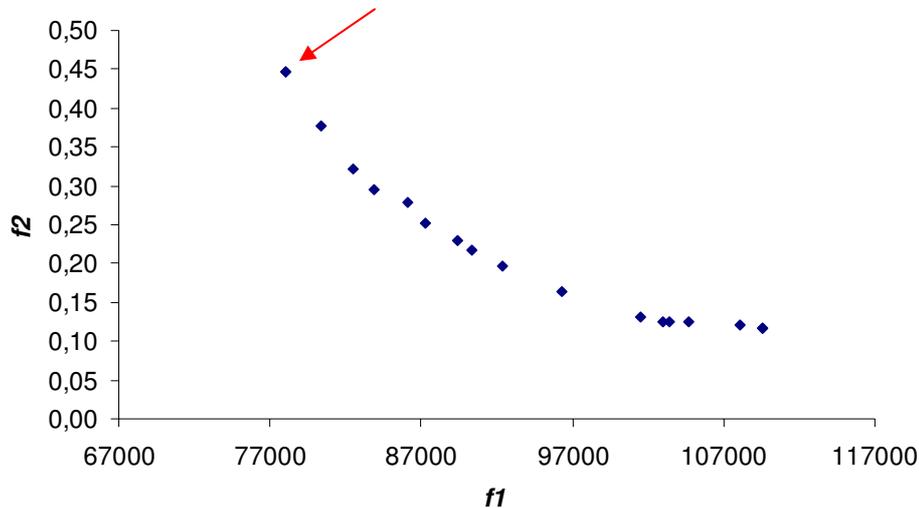


Figura 6.10 – Soluções no espaço objetivo para o controle integrado (volt/var) do alimentador 02, considerando apenas a alocação de capacitores.

Para o caso de se instalar apenas capacitores obtém-se uma expressiva redução de perdas de energia, correção do fator de potência e melhoria significativa do perfil de tensão. Dependendo da carga e da topologia do alimentador algumas barras podem apresentar níveis de tensão abaixo do permitido. Caso isso não ocorra, ou seja, enquanto as tensões de todas as barras estejam dentro da faixa admissível, a decisão de se instalar ou não reguladores de tensão depende sobretudo da previsão de crescimento de carga.

6.4.2 – Apenas Reguladores de Tensão

Utilizando o mesmo alimentador real de 167 barras, apresenta-se agora o caso de se considerar apenas a colocação de reguladores de tensão. Apresenta-se na Figura 6.11 um cromossomo que representa uma solução presente no grupo dos *não-dominados* (arquivo). Esta solução também está destacada das demais na Figura 6.13, quando são apresentadas no espaço objetivo.

As barras onde os bancos são instalados estão apresentadas conforme a técnica de redução de espaço de busca apresentada na seção 5.3.1.

Endereço para R ₁	tap p/carga de:			Endereço para R ₂	tap p/carga de:		
	p	i	l		p	i	l
0	7	6	5	6	5	4	2

Figura 6.11 – Cromossomo presente no arquivo após a convergência do SPEA2 considerando apenas alocação de reguladores de tensão (Alimentador 02).

Reescrevendo os vetores de barras candidatas para o regulador 1 (V_{bcr1}) e para o regulador 2 (V_{bcr2}), conforme obtidos na seção 6.2.2, tem-se que para o cromossomo da Figura 6.11, o regulador 1 é instalado na barra 14 e o regulador 2 na barra 109.

$$V_{bcr1} = [14 \ 15 \ 18 \ 19 \ 42 \ 44 \ 45 \ 46]$$

$$V_{bcr2} = [84 \ 86 \ 87 \ 88 \ 102 \ 104 \ 109 \ 110 \ 113 \ 116 \ 117 \ 118 \ 121 \ 124 \ 125 \ 127 \\ 128 \ 134 \ 150 \ 152 \ 153 \ 156 \ 157 \ 158 \ 159 \ 161 \ 162 \ 163 \ 164 \ 165]$$

Todas as barras apresentam nível de tensão dentro do permitido, atendendo à restrição de tensão. O primeiro regulador foi instalado na barra 14 (primeira barra do vetor V_{bcr1}) e a potência calculada foi de 414 kVA. O segundo regulador foi instalado na barra 109 (sétima barra do vetor V_{bcr2}) e a potência calculada foi de 207 kVA.

Os perfis de tensão apresentados na Figura 6.12 são para a condição inicial sem equipamentos instalados e após a colocação dos dois bancos de reguladores de tensão.

A tensão mínima de todo o alimentador foi de 0,97 p.u e a tensão máxima de 1,04 p.u. Assim, a correção do perfil de tensão é plenamente satisfatória quando se utiliza apenas reguladores de tensão. Entretanto, para as perdas de energia a redução é bem menor quando comparada ao caso de se utilizar capacitores, conforme apresentado na Tabela 6.8.

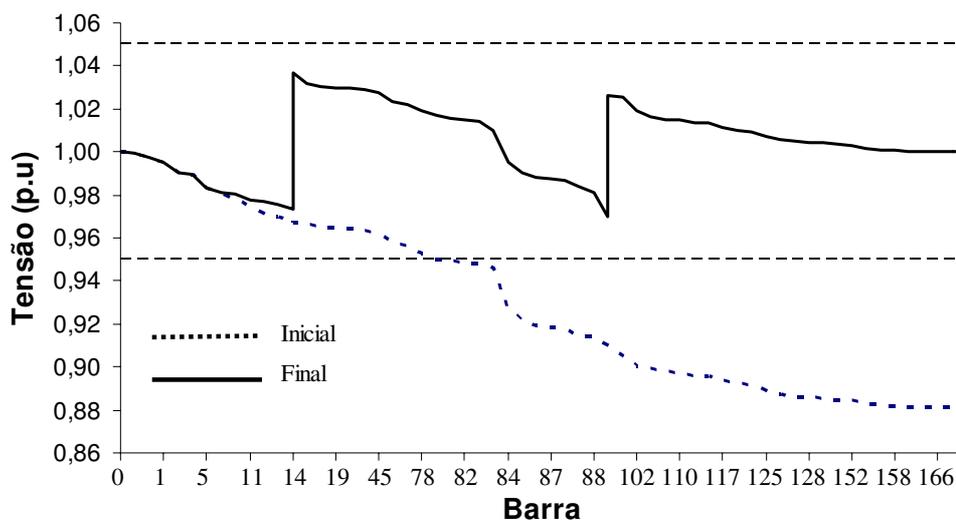


Figura 6.12 – Perfis de tensão do tronco para a condição de carga de pico (Alimentador 02), considerando apenas alocação de reguladores de tensão.

Neste caso, as perdas totais anuais diminuiram de 4,79% para 4,31 %. Uma redução maior poderia ser obtida com a elevação do perfil de tensão (modelo de carga de potência constante), mas normalmente com violação do limite máximo estabelecido.

Tabela 6.8 - Perdas anuais de energia e Fator de Potência total para uma das soluções *não-dominadas* presentes no arquivo (somente reguladores de tensão).

Condição		F.P	MWh	Redução de perdas
167 barras	inicial	0,85	1453,5	10,40 %
	final	0,85	1302,0	

Apresenta-se na Figura 6.13 a distribuição das soluções *não-dominadas* no espaço objetivo, onde também está indicada a solução do cromossomo da Figura 6.11.

Conforme se vê, a distribuição apresentada indica que houve uma faixa de valores para o objetivo de redução de perdas (f_1) bem mais estreita, quando comparada com o caso de se utilizarem concomitantemente capacitores e reguladores de tensão apresentada na Figura 6.7.

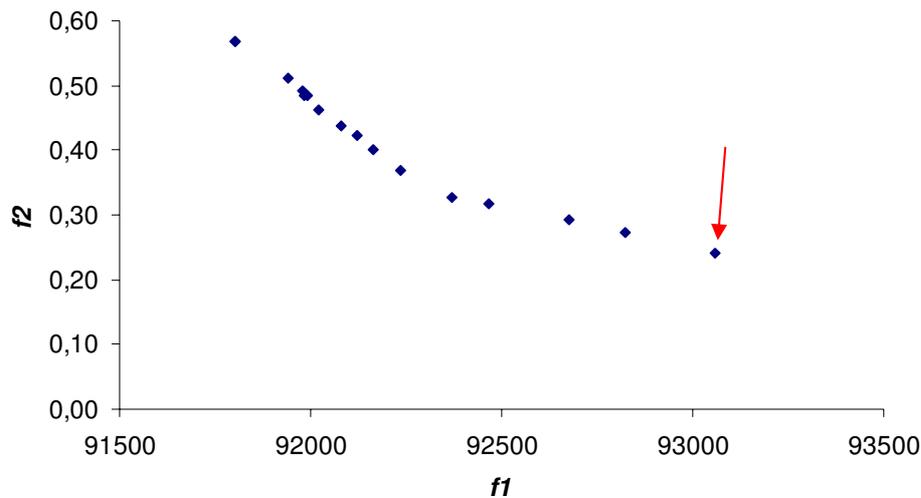


Figura 6.13 – Soluções no espaço objetivo para o controle integrado (volt/var) do alimentador 02, considerando apenas a alocação de reguladores de tensão.

6.5 A Escolha do Decisor

A escolha de uma solução pertencente ao grupo de soluções *não-dominadas* depende de quais aspectos o decisor, responsável pelo planejamento, enumere e organize por ordem de prioridade.

Por exemplo, quando o enfoque é notadamente o de custos, as soluções que representam menor custo final das perdas são as mais atraentes e pode-se avaliar a possibilidade de não instalar reguladores de tensão. Isto pode ser feito desde que se tenham poucas barras com níveis de tensão ligeiramente abaixo do limite mínimo de 0,95 p.u. Este pode ser o caso de alimentadores com carga tipicamente residencial e cujos ajustes de níveis de tensão entregues ao consumidor também podem ser realizados através de mudanças de *taps* dos transformadores de distribuição.

Quando a qualidade da energia entregue ao consumidor está em primeiro plano, não se pode prescindir de um controle rígido dos limites de tensão e ainda do Fator de Potência da rede.

Em alimentadores radiais de distribuição, o controle integrado de tensão e reativos (*volt/var*) no âmbito de planejamento mostrou-se plenamente viável quando se utilizam módulos de capacitores fixos e chaveados concomitantemente com bancos de reguladores de tensão monofásicos.

A utilização de métodos de otimização multiobjetivos e que oferecem um conjunto de soluções ótimas para a localização e ajustes ótimos destes equipamentos permite ao decisor escolher a solução que melhor lhe atenda, através de critérios que poderão inclusive vir a fazer parte da formulação do método.

Capítulo 7

Conclusões

O problema do controle integrado de tensão e reativos (volt/var), no âmbito do planejamento, foi resolvido através de um método de otimização multiobjetivo chamado SPEA2 (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*, Zitzler et al, 2002) e incrementado através da lógica *fuzzy*. Para o controle integrado (volt/var) foram realizados: o dimensionamento de bancos de capacitores fixos e chaveados, bem como a localização e ajustes ótimos de um banco de reguladores de tensão para três patamares da curva de carga. O algoritmo apresentado foi aplicado a um alimentador radial de 69 barras conhecido da literatura e também para um sistema real, de 167 barras, do sistema de distribuição da CEAL.

O problema é de otimização combinatória multiobjetivo, visto que o espaço de busca é um conjunto de variáveis discretas: barras onde se localizam os equipamentos e programação de operação. Esta característica foi plenamente considerada com SPEA2.

Os alimentadores utilizados foram avaliados em diferentes condições, sendo a primeira o pior caso que é em carga de pico e sem equipamentos instalados. Em seguida com os equipamentos para as três condições de carga: pico, intermediária e leve.

Foram apresentados resultados para instalação de um banco de reguladores no primeiro alimentador e de dois bancos para o segundo alimentador. Todavia, o método apresentado continua válido para um número maior de bancos de reguladores.

A formulação para a função objetivo de reguladores de tensão, utilizando uma função de pertinência triangular da lógica *fuzzy*, manteve a premissa de limitar as tensões de barra o mais próximo possível da tensão de referência, normalmente tomada como a tensão nominal do alimentador.

A inserção do conhecimento especialista através da lógica *fuzzy*, considerando aspectos práticos como, por exemplo, o dimensionamento da potência do regulador, trouxe uma significativa redução do espaço de busca para o controle de tensão, verificada em ambos os alimentadores apresentados.

A análise de sensibilidade para redução do espaço de busca para capacitores através da lógica *fuzzy* utilizou as variáveis de entrada: *redução de perdas*, *fator de potência* e nível médio de *tensão das barras* (p.u). Estas variáveis são sensíveis à compensação reativa. Através da composição de regras, foram analisadas a sensibilidade individual (mais restritiva) e a sensibilidade conjunta, para cada barra, obtendo-se um conjunto final de barras candidatas que trouxe uma expressiva redução no espaço de busca sem degradar a qualidade das soluções obtidas pelo algoritmo.

A codificação apresentada se mostrou eficiente, pois evita que se tenham cromossomos defeituosos e que representam soluções inactíveis. A decodificação da parte de capacitores permite quais tipos de módulos (fixos e chaveados) devam estar presentes na barra candidata.

As funções objetivo de capacitores e reguladores de tensão foram implementadas matematicamente de forma independente, mas os resultados de uma

influenciam fortemente os resultados da outra, devido ao fato de que as variáveis tensão e perdas não serem independentes.

O capacitor foi modelado como carga de impedância constante. Esta consideração permitiu uma precisão maior no número de módulos alocados e economia líquida advinda da redução de perdas, visto que a potência reativa fornecida pelos capacitores varia com o quadrado da tensão em que estes estão trabalhando.

Na análise individual, quando foram alocados apenas capacitores para resolver o problema volt/var, obteve-se satisfatoriamente a redução de perdas e correção do fator de potência. Entretanto, algumas barras apresentaram níveis de tensão abaixo do mínimo permitido. Quando se instalou apenas reguladores de tensão, a correção do perfil de tensão foi satisfatória enquanto que a redução de perdas ficou muito abaixo do desejado.

A distribuição e diversidade das soluções no espaço objetivo apresentaram melhor performance na análise individual de capacitores.

A população final do arquivo no SPEA2 em todos os casos abordados é uma boa aproximação da fronteira de Pareto. A função *fitness* implementada produziu soluções *não-dominadas* que atenderam aos critérios definidos para o controle integrado de tensão e reativos (volt/var). Entretanto, a diversidade das soluções ao longo da fronteira poderia ter sido melhor, visto que em algumas regiões observa-se uma proximidade grande entre soluções e um afastamento em outras. Isto provavelmente se deve à eficiência do algoritmo de corte do SPEA2.

O algoritmo implementado atendeu aos principais objetivos de reduzir perdas e corrigir o perfil de tensão do alimentador de forma satisfatória, ou seja, uma considerável redução de perdas, bem como a correção do perfil de tensão em todas as barras do alimentador para os níveis adequados (Resolução ANEEL N° 505).

Contribuições futuras ao presente método podem ser acrescentadas como a consideração de diferentes modelos de carga e alimentadores com geração distribuída.

Também podem ser acrescentados mais objetivos como:

- localização de filtros harmônicos, capacitores e reguladores de tensão;
- considerar a minimização do transitório eletromagnético provocado pelos capacitores chaveados e na mudança dos *taps* dos reguladores de tensão;

Para incluir filtros harmônicos deve-se considerar a presença de cargas não lineares, geradoras de harmônicos, executar um fluxo de harmônicos e compor uma função objetivo que represente bem este efeito. Um índice típico para este caso é a *distorção harmônica total* ($D_{HT}(\%)$) da rede.

A consideração do transitório eletromagnético proveniente do chaveamento dos capacitores e mudanças de *taps* de reguladores de tensão é um estudo que pode ser feito a partir de análises dos efeitos de tais chaveamentos através do uso de programas do tipo ATP (*Alternative Transients Program*). Para Cada indivíduo da população seriam calculadas a duração e magnitude dos transitórios. De posse destas informações, pode-se compor mais uma função objetivo a ser minimizada.

Referências Bibliográficas

Agência Nacional De Energia Elétrica. Resolução ANEEL N° 505, de 26 de Novembro de 2001. Republicada na íntegra, por determinação do Art. 4° da Resolução Aneel 676, de 19 de dezembro de 2003. Brasília, DF., Dezembro de 2004. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>.

Almeida A.M.F. (2004). “Algoritmos Genéticos Para Localização e Ajustes Ótimos de Reguladores de Tensão em Sistemas de Distribuição”, Dissertação (mestrado), Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal da Paraíba - UFCG.

Almeida, A.M.F., Souza, B.A., Pamplona, F.M.P., Braz, H.D.M. (2005a). “Optimal Localization Of Voltage Regulator Banks In Distribution Systems Based On Technical And Economic Criteria”. CIREC - 18th International Conference on Electricity Distribution, Turin - 2005.

Almeida, A.M.F., Pamplona, F.M.P., Braz, H.D.M., Souza, B.A. (2005b). “Controle Integrado do Perfil de Tensão e de Distorções Harmônicas em Alimentadores Radiais de Distribuição com Aplicação Simultânea de Reguladores de Tensão e Filtros Harmônicos Passivos”. VI SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica.

Almeida, A.M.F., Braz, H.D.M., Pamplona, F.M.P., Souza, B.A. (2007a). “Planejamento Integrado de Bancos de Capacitores e Reguladores de Tensão em Redes de Distribuição”. VII CBQEE – Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica

- Almeida, A.M.F., Souza, B.A., Braz, H.D.M., Pamplona, F.M.P. (2007b). “Volt/Var Control In Distribution Systems As A Multiobjective Optimization Problem”. VIII SBAI – Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente
- Almeida, A.M.F., Souza, B.A., Braz, H.D.M., Pamplona, F.M.P. (2008). “Genetic Algorithm and Fuzzy Logic Applied to Planning of Voltage Regulators in Distribution Systems”. Proceedings of XXIX CILAMCE - Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering – 4-7 November, 2008.
- Alves, M. L.; (2005). “Módulo de Alocação Otimizada de Reguladores de Tensão e Bancos de Capacitores em Alimentadores de Distribuição”. Porto Alegre, RS. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.
- Arroyo, J.E.C., (2002). “Heurísticas E Metaheurísticas Para Otimização Combinatória Multiobjetivo”. Tese (doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.
- Bansal, R. C. (2003). “ Bibliography on the fuzzy set theory applications in power systems (1994-2001)”. IEEE Transactions on Power Systems, v. 18, n. 4, p. 1291–1299, 2003.
- Baran, M. E. and Wu, F. F. (1989). ” Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems”. IEEE Trans. On Power Delivery (January), Vol. 4, pp. 725-734. 1996.
- Bernal-Agustín, J.L.B. (1998). “Aplicación de Algoritmos Genéticos al Diseño Óptimo de Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica”. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, Spain. 1998.
- Bishop, M.T, Foster, J.D, Down, D.A. (1996). “Single-Phase Voltage Regulators and Three-Phase Systems”. IEEE Industry Applications Magazine, pp. 38-44, July/August.
- Bremermann, L.E. (2008). “Controle Fuzzy Volt/Var em Sistemas de Distribuição”. Porto Alegre/RS. Dissertação (mestrado) – PUC-RS, Faculdade de Engenharia .

- Canôas, A.C.G. (2008). “Lógica Nebulosa e Técnica de Otimização Particle Swarm Aplicadas ao Controle de Tensão e de Potência Reativa”. Campinas/SP. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.
- Carpinelli, G., Noce, C., Proto, D., Varilone, P. (2006). “Voltage Regulators and Capacitor Placement in Three-phase Distribution Systems with Non-linear and Unbalanced Loads”, International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol. 7, Issue 4, Article 1, November 2006.
- Carrano, E.G., Soares, L.A.E., Takahashi, R.H.C., Saldanha, R.R., Neto, O.M. (2006). “Electric Distribution Network Multiobjective Design using a Problem-specific Genetic Algorithm,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 2, April 2006, pp. 995-1005.
- Chankong, V., Haimes, Y.Y. (1983). “Multiobjective Decision Making -Theory and Methodology”, New York: North-Holland.
- Civanlar, S., Grainger, J.J. (1985a). “Volt/Var Control on Distribution with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators. Part II: The Solution Method”. IEEE on Power Apparatus and Systems, vol. 104, pp. 3284-3290, Nov. 1985.
- Civanlar, S., Grainger, J.J. (1985b). “Volt/Var Control on Distribution with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators. Part III: The Numerical Results”. IEEE on Power Apparatus and Systems, vol. 104, pp. 3291-3297, Nov. 1985.
- Cris, M., Salama M.M.A., Jayaram, S. (1997). Capacitor Placement in Distribution Systems Using Heuristic Search Strategies. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, UK, 144(2):225-230. 1997.

- Coello C.A.C (1996). “An Empirical Study of Evolutionary Techniques for Multiobjective Optimization in Engineering Design”, Thesis, Department of Computer Science, Tulane University, New Orleans, LA.
- Coello C.A.C. (2000). “An Updated Survey of GA-Based Multiobjective Optimization Techniques”, ACM Computing Surveys, vol. 32, n° 2, pp. 109-143.
- Coello, C.A.C., Pulido, G.T. (2001). “Multiobjective optimization using a micro-genetic algorithm.” Proceedings of GECCO-2001 pp. 274–282, Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, July, 2001.
- Cohon, J.L. (1978).“Multiobjective Programming and Planning”. New York: Academic Press.
- Das, D., Kothari, D.P., Kalam, A. (1995) “Simple and Efficient Method for Load Flow Solution of Radial Distribution Networks”. Electrical Power & Energy Systems, vol. 17, pp. 335-346, May 1995.
- Das, D. (2002).“Reactive Power Compensation for Radial Distribution Networks Using Genetic Algorithm”. Electrical Power & Energy Systems, vol. 24, pp. 573-581.
- Deb K. Agrawal S. Pratab A., Meyarivan T. (2002). “A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II”. IEEE Transactions On Evolutionary Computation, vol. 6, no. 2, April.
- Dhar, S. B. (1979). “Power system long-range decision analysis under fuzzy environment”. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, v. 2, p. 585–596, 1979.
- Ehrgott M., Gandibleux X. (2000). “A survey and annotated bibliography of multicriteria combinatorial optimization”, OR Spektrum, forthcoming.
- Ferreira, H.A., Souza, B.A., Alves, H.N. (2002). “Optimal Capacitor Allocation in Electrical Distribution Systems Using Genetic Algorithm”. IEEE/PES T&D Latin America 2002.

- Fonseca C.M., Fleming P.J. (1993). “Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization”, In S. Forrest (Ed.), Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms, San Mateo, California, pp. 416-423.
- Goldberg D.E., Richardson (1987). “Genetics Algorithm with sharing for multimodal function optimization”, In J.J. Grefenstette (Ed.), Genetics Algorithms and Their Applications: Proceedings of the Second International Conference on Genetics Algorithms (pp. 41-49). San Mateo, CA:Morgan Kaufmann.
- Goldberg, D.E. (1989). “Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning”. Addison-Wesley, 412p.
- Gönen, T. (1986). “Electric Power Distribution System Engineering”. NYk: McGraw-Hill.
- Grainger, J.J., Civanlar, S. (1985). “Volt/Var Control on Distribution with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators. Part I: The Overall Problem”. IEEE on Power Apparatus and Systems, vol. 104, pp. 3278-3283, Nov. 1985.
- Gross, C.A. “Power System Analysis.” 2nd Ed., John Wiley & Sons, 1986, pp. 329.
- Hashimoto, K. (2004). “Técnicas de Otimização Combinatória Multiobjetivo Aplicadas na Estimção do Desempenho Elétrico de Redes de Distribuição”. Tese Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.
- Holland, J.H. (1975). “Adaptation in Natural and Artificial Systems”. University of Michigan Press, 211p.
- Horn J., Nafpliotis N. (1993). “Multiobjective optimization using the niche Pareto genetic algorithm”, IlligAL Report 93005, Illinois Genetic Algorithm Laboratory, University of Illinois, Urbana, Champaign.

- Hsiao, Y.T. & Chien, C.Y. (2000). "Enhancement of restoration service in distribution systems using a combination fuzzy-GA method". *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, pp. 1394–1400, Nov. 2000.
- Huang, Y. C., Yang, H. T., Huang, C. L. (1996). "Solving the capacitor placement problem in radial distribution system using tabu search approach". *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 4, pp.1868-1873, November 1996.
- Hu, Z., Wang, X., Chen, H., Taylor, G.A. (2003). "Volt/Var Control in Distribution Systems Using a Time-Interval Based Approach". *IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*, vol. 150, n° 5, September.
- Ishibuchi H., Murata T. (1998). "A multi-objective genetic local search algorithm and its application to flowshop scheduling", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-part C: Applications and Reviews*, vol. 28, pp. 392-403.
- Jones D.F., Mirrazavi S.K., Tamiz M. (2002). "Multi-objective meta-heuristics: An overview of the current state-of-art", *European Journal of Operational Research* vol.137, pp. 1-19.
- Kagan, N. Oliveira, C.C.B, Méffe, A. (2004). "Alocação de Bancos de Capacitores e Reguladores de Tensão em Redes de Distribuição". *IEEE/PES T&D Latin America 2004*. São Paulo-SP.
- Laframboise, J.R.P.R, Salama M.M.A., Ferland, G., Chikhani, A.Y. (1995). "An Expert System for Reactive Power Control of a Distribution System. Part II: System Implementation". *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, pp. 1433-1441, August.
- Lee, H.J., Park, D.Y., Ahn, B.S., Ahn, Y.M., Park, J.K. and Venkata, S.S. (2000). "A fuzzy expert system for the integrated fault diagnosis". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, pp. 833–838, Apr. 2000.

- Liang, R.H. & Cheng, C.C. (2002). “Short-term load forecasting by a neuro-fuzzy based approach”. *Elect. Power Energy Syst.*, vol. 26, no. 2, pp. 103–111, 2002.
- Liang, R.-H. & Wang, Y.-S. (2003). “Fuzzy-based reactive power and voltage control in a distribution system”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 18, n. 2, p. 610–618, 2003.
- Liu, C.W., Su, M.C., Tsay, S.S. and Wang, Y.J. (1999). “Application of a novel fuzzy neural network to real-time transient stability swings prediction based on synchronized phasor measurements”. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, pp. 685–692, May 1999.
- Liu, Y., Qiu, X.. (2000). “Optimal Reactive Power and Voltage Control for Radial Distribution System”. *Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, WA, vol. 1, pp. 85-90, July.*
- Liu, Y., Shi J., Qian, X. (2005). “Reactive Power Compensation and Voltage Control in Jinan Power Distribution System”. *CIREN - 18th International Conference on Electricity Distribution, Turin - 2005.*
- Mantovani, J.R.S., Garcia, A.V. (1995).” A Heuristic Method For Reactive Power Planning.” *The 1995 IEEE Power Engineering Society. Winter Meeting, PP 1-7, 1995.*
- Matos, M.A. (1999). “A Fuzzy Filtering Method Applied to Power Distribution Planning”. *Fuzzy Sets Systems*, vol. 102, no. 1, pp. 53–58, Feb. 1999.
- Medeiros Jr., M.F., Pimentel Filho, M.C. (2002). “Localização Ótima de Bancos Trifásicos de Reguladores de Tensão em Alimentadores Radiais de Distribuição. *XIV Congresso Brasileiro de Automática*, p. 2066-2071.

- Mendoza, F., Bernal-Agustín, J.L., Domínguez-Navarro, J.A. (2006). “NSGA and SPEA Applied to Multiobjective Design of Power Distribution Systems”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, N° 4, November 2006.
- Mendoza, J.E., López, E.A., Morales, D.A., López, R.A., López, M., Vannier, J.C.. (2005). “Optimal Location Of Voltage Regulators In Radial Distribution Networks Using Genetic Algorithms” in Proceedings of 15th Power Systems Computation Conference, Belgium, August.
- Mendoza, J.E., Morales, D.A., López, R.A., López, E.A., Vannier, J.C., Coello, C.A.C. (2007). “Multiobjective Location of Automatic Voltage Regulators in a Radial Distribution Network Using a Micro Genetic Algorithm” IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 22, N° 1, February.
- Milošević, B., Begović, M. (2004). “Capacitor Placement for Conservative Voltage Reduction on Distribution Feeders”. IEEE Transactions on Power Delivery, vol 19, N° 3, pp. 1360-1367, July (2004).
- Miranda, V., Moreira A. Pereira, J.(2007). “An Improved Fuzzy Inference System for Voltage/var Control”. IEEE Transactions On. Vol. 22. pp. 2013-2020. Nov. 2007.
- Morse, J. N. (1980). “Reducing the size of the nondominated set: Pruning by clustering”, Computers and Operations Research 7(1-2): 55-66.
- Ng, H. N., Salama, M. M. A., Chikhani, A. Y. (2000a). “Classification of Capacitor Allocation Techniques.” IEEE Transactions on Power Delivery, EUA, 15(1):387-392. 2000a.
- Ng, H. N., Salama, M. M. A., Chikhani, A. Y.,. (2000b).”Capacitor Allocation by Approximate Reasoning: Fuzzy Capacitor Placement”. IEEE Transactions on Power Delivery, EUA, 15(1):393-398.(2000b).

- Oliveira, C.C.B., Kagan, N. (1998). “Modelagem Heurística para a Seleção e Locação de Bancos de Capacitores e Reguladores de Tensão em Redes de Distribuição de Energia Elétrica”. – Congresso Latino Americano de Distribuição, pp.602-606.
- Pereira Jr, B.R., Cossi, A.M., Mantovani, J.R.S. (2006). ” Alocação de Bancos de Capacitores em Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Algoritmo Evolutivo Multi-Objetivo”. Anais do XVI CBA Congresso Brasileiro de Automática. Salvador, BA.
- Pereira Jr, B.R., Mantovani, J.R.S. (2008). ” Alocação de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição Considerando as Incertezas” das Cargas. Anais do XVII CBA Congresso Brasileiro de Automática. Juiz de Fora, MG.
- Rahardjo, P.T. (2003). “Justification on the applications of automatic voltage regulator and capacitor on long Medium Voltage distribution feeders”. CIREN 2003, p. 839-843.
- Rao, A. S. G., Rao K. R., Ananthapadmanabha, T., Kulkarni, A.D. (1996). ” Knowledge-Based Expert System for Optimal Reactive Power Control in Distribution Systems”, Electrical Power & Energy Systems, 18(1):27-31.
- Safigianni, A.S, Salis, G.J. (2000). “Optimum Voltage Regulator Placement in Radial Power Distribution Network”. IEEE Transaction on Power Systems, vol. 15, n° 2, pp. 879-886, May.
- Salama M.M.A., Chikhani, A.Y. (1992). “An Expert System for Reactive Power Control of a Distribution System. Part I: System Configuration”. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, pp. 940-945, April.
- Saleh, R.A.F. & Bolton, H.R. (2001). “Genetic algorithm-aided design of a fuzzy logic stabilizer for a superconducting generato”. IEEE Transations on Power Systems, vol. 15, pp. 1329–1335, Nov. 2001.

- Santos, J.R., Expósito, A.G., Ramos, J.L.M. (2004). “A Reduced-Size Genetic Algorithm for Optimal Capacitor Placement on Distribution Feeders”. IEEE Melecon, May 2004.
- Schaffer J.D. (1985) “Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms”, International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann, New York, pp. 93-100.
- Shaw, I. S. e Simões, M. G. (1999). “Controle e Modelagem Fuzzy”. Edgard Blücher Ltda. Primeira Edição. 1999.
- Souza, B.A., Alves, H.N., Almeida, A.M.F. (2004a). “Um Algoritmo Genético para Localização Ótima de Reguladores de Tensão em Redes de Distribuição”. XV Congresso Brasileiro de Automática – CBA 2004.
- Souza, B.A., Almeida, A.M.F., Alves, H.N. (2004b). “Localização e Ajustes Ótimos de Bancos de Reguladores Automáticos em Redes de Distribuição Utilizando Algoritmos Genéticos”. IEEE/PES T&D Latin America 2004.
- Souza, B.A., Alves, H.N., Ferreira, H.A. (2004c). “Microgenetics Alghorithm and Fuzzy Logic Applied to the Optimal Placement of Capacitor Banks in Distribution Networks”. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 2, pp. 942-947, May 2004.
- Srinivas N., Deb K. (1994). “Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms” Evolutionary Computation, vol. 2(3) pp. 221-248.
- IEEE Standard C57.15-1999. “IEEE Standard Requirements, Terminology, and Test Code for Step-Voltage Regulators”. Recognized as an American National Standard (ANSI). Approved 16 September 1999 IEEE-SA Standards Board. ISBN 0-7381-1834-6 SS94799.
- Steuer, R.E. (1986). “Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application.” New York: Wiley.

- Szuovovivski, I. (2008). “Alocação Simultânea de Bancos de Capacitores e Reguladores de Tensão em Sistemas de Distribuição Usando Algoritmos Genéticos e Fluxo de Potência Ótimo.” Dissertação (mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná.
- Van Veldhuizen D.A., Lamont G.B. (2000). “Multiobjective evolutionary algorithms: Analysing the state-of art”, Evolutionary Computation, vol. 8(2), pp. 125-147.
- Westinghouse Electric Corporation. Electric Utility Reference Book –Distribution Systems, vol. 3, East Pittsburgh, Pa., 1965.
- Wu, Y.C. (2001). “Fuzzy second correction on complementary condition for optimal power flows”. IEEE Transactions on. Power Systems, vol. 16, pp. 360–364, Aug. 2001.
- Zadeh, L. A. (1965). “Fuzzy sets, Information and Control”, v. 8, p. 338–353, 1965.
- Zitzler E., Thiele L. (1999). “Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength pareto approach”, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol.3, nº 4, pp. 257-271.
- Zitzler, E., Laumanns, M., Thiele, L., (2002). “SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm for Multiobjective Optimization.” In: Evolutionary Methods for Design, Optimisation, and Control, Barcelona, Spain (2002) 19–26.
- Zitzler, E., Laumanns, M., Bleuler, S., (2004). “A Tutorial on Evolutionary Multiobjective Optimization,” In Xavier Gandibleux et al., editor, Metaheuristics for Multiobjective Optimization, pp. 3–37, Berlin, Springer. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems Vol. 535.

Apêndice A

Dados do Sistema Real Utilizado para Aplicação

Na Tabela A.1 estão contidos os dados do sistema real utilizado (alimentador CZA03 da CEAL) para aplicação do algoritmo implementado neste trabalho. A barra da subestação é identificada pelo código 0 (zero) e sua tensão é de 13.8 kV.

Tabela A.1 – Dados do alimentador CZA03 da CEAL.

De	Para	Comp. (km)	R (Ω /km)	X (Ω /km)	S _{inst} (kVA)	De	Para	Comp. (km)	R (Ω /km)	X (Ω /km)	S _{inst} (kVA)
0	1	0,03	0,4926	1,0358	0	51	52	0,08	3,1264	2,3235	45
1	2	0,07	0,4926	1,0358	0	52	53	0,01	3,1264	2,3235	0
2	3	0,08	0,4926	1,0358	0	53	54	0,04	3,1264	2,3235	75
3	4	0,19	0,4926	1,0358	0	54	55	0,04	7,8975	2,5062	0
4	5	0,03	0,4926	1,0358	0	54	56	0,28	3,1264	2,3235	0
5	6	0,015	7,8975	2,5062	112,5	56	57	0,04	7,8975	2,5062	112,5
5	7	0,24	0,4926	1,0358	0	53	58	0,04	3,1264	2,3235	0
7	8	0,04	7,7998	2,6202	150	58	59	0,16	3,1264	2,3235	0
7	9	0,09	0,4926	1,0358	0	59	60	0,04	7,8975	2,5062	75
9	10	0,03	0,4926	1,0358	0	59	61	0,08	3,1264	2,3235	0
10	11	0,12	0,4926	1,0358	0	61	62	0,04	7,8975	2,5062	150
11	12	0,04	0,4926	1,0358	0	61	63	0,24	3,1264	2,3235	607,5
12	13	0,08	0,4926	1,0358	0	63	64	0,055	2,8049	2,1657	0
13	14	0,08	0,4926	1,0358	0	64	65	0,07	2,8049	2,1657	45
14	15	0,205	0,4926	1,0358	0	63	66	0,04	7,8975	2,5062	112,5
15	16	0,04	3,1264	2,3235	0	66	67	0,08	5,5151	2,7124	0
16	17	0,04	3,1264	2,3235	75	67	68	0,055	5,5151	2,7124	0
15	18	0,075	0,4926	1,0358	0	68	69	0,075	5,5151	2,7124	75
18	19	0,01	0,4926	1,0358	0	69	70	0,12	5,5151	2,7124	0
19	20	0,04	3,1264	2,3235	0	70	71	0,145	5,5151	2,7124	75
20	21	0,09	3,1264	2,3235	0	71	72	0,05	5,5151	2,7124	0
21	22	0,05	3,1264	2,3235	75	72	73	0,03	7,8975	2,5062	75
21	23	0,08	3,1264	2,3235	0	72	74	0,065	5,5151	2,7124	112,5
23	24	0,12	3,1264	2,3235	0	67	75	0,2	5,5151	2,7124	112,5
24	25	0,12	7,8975	2,5062	0	48	76	0,04	3,1264	2,3235	0
25	26	0,16	7,8975	2,5062	45	76	77	0,24	7,7998	2,6202	112,5
25	27	0,09	7,8975	2,5062	75	77	78	0,135	7,8975	2,5062	112,5
24	28	0,04	3,1264	2,3235	112,5	76	79	0,04	0,6984	2,0024	0
28	29	0,03	3,1264	2,3235	0	79	80	0,02	0,6984	2,0024	45
29	30	0,08	3,1264	2,3235	0	80	81	0,03	0,6984	2,0024	150
30	31	0,23	3,1264	2,3235	112,5	81	82	0,07	0,6984	2,0024	0
31	32	0,16	3,1264	2,3235	0	82	83	0,135	7,8975	2,5062	75
32	33	0,01	3,1264	2,3235	45	83	84	0,2	0,6984	2,0024	0
32	34	0,08	3,1264	2,3235	0	84	85	0,12	7,8975	2,5062	150
34	35	0,06	3,1264	2,3235	112,5	84	86	0,08	0,6984	2,0024	75
34	36	0,04	7,7998	2,6202	45	86	87	0,04	0,6984	2,0024	0
29	37	0,24	7,8975	2,5062	45	87	88	0,02	0,6984	2,0024	0
37	38	0,05	7,8975	2,5062	112,5	88	89	0,095	0,4926	1,0358	0
20	39	0,06	7,8975	2,5062	0	89	90	0,045	7,8975	2,5062	112,5
39	40	0,14	7,8975	2,5062	0	90	91	0,055	7,8975	2,5062	75
40	41	0,02	7,8975	2,5062	45	89	92	0,095	0,4926	1,0358	45
19	42	0,03	0,4926	1,0358	0	92	93	0,225	0,4926	1,0358	75
42	43	0,04	3,1264	2,3235	112,5	93	94	0,67	0,4926	1,0358	45
42	44	0,03	0,4926	1,0358	0	94	95	0,035	0,4926	1,0358	0
44	45	0,04	0,4926	1,0358	112,5	95	96	0,05	7,8975	2,5062	45
45	46	0,12	0,6984	2,0024	0	95	97	0,035	0,4926	1,0358	0
46	47	0,04	0,6984	2,0024	112,5	97	98	0,075	7,8975	2,5062	225
47	48	0,08	0,6984	2,0024	0	98	99	0,035	0,4926	1,0358	0
48	49	0,2	3,1264	2,3235	0	99	100	0,04	7,8975	2,5062	75
49	50	0,03	7,8975	2,5062	75	99	101	0,07	0,4926	1,0358	0
49	51	0,11	3,1264	2,3235	75	88	102	0,145	0,6984	2,0024	0

De	Para	Comp. (km)	R (Ω /km)	X (Ω /km)	S _{inst} (kVA)	De	Para	Comp. (km)	R (Ω /km)	X (Ω /km)	S _{inst} (kVA)
102	103	0,16	7,8975	2,5062	150	156	157	0,08	0,6984	2,0024	75
102	104	0,015	0,6984	2,0024	382,5	157	158	0,04	0,6984	2,0024	15
104	105	0,1	7,7998	2,6202	0	158	159	0,19	0,6984	2,0024	0
105	106	0,015	7,8975	2,5062	75	159	160	0,12	7,8975	2,5062	30
105	107	0,05	3,1165	2,4063	150	159	161	0,12	0,6984	2,0024	862,5
105	108	0,095	7,8975	2,5062	45	161	162	0,12	0,4926	1,0358	75
104	109	0,2	0,6984	2,0024	112,5	162	163	0,225	0,4926	1,0358	112,5
109	110	0,04	0,6984	2,0024	0	163	164	0,08	0,4926	1,0358	600
110	111	0,16	7,8975	2,5062	0	164	165	0,085	0,4926	1,0358	0
111	112	0,145	3,1165	2,4063	75	165	166	0,065	0,4926	1,0358	75
110	113	0,1	7,8975	2,5062	0	166	167	0,03	0,4926	1,0358	0
113	114	0,04	7,8975	2,5062	112,5						
113	115	0,16	7,8975	2,5062	112,5						
113	116	0,04	0,6984	2,0024	45						
116	117	0,08	0,6984	2,0024	0						
117	118	0,04	0,6984	2,0024	0						
118	119	0,08	7,7998	2,6202	45						
119	120	0,12	7,8975	2,5062	45						
118	121	0,07	0,6984	2,0024	0						
121	122	0,13	5,5151	2,7124	75						
122	123	0,18	0,6984	2,0024	112,5						
121	124	0,03	0,6984	2,0024	75						
124	125	0,135	0,6984	2,0024	0						
125	126	0,04	7,8975	2,5062	45						
125	127	0,07	0,6984	2,0024	75						
127	128	0,07	0,6984	2,0024	0						
128	129	0,04	7,7998	2,6202	0						
129	130	0,04	7,7998	2,6202	75						
129	131	0,12	7,7998	2,6202	75						
131	132	0,16	7,7998	2,6202	75						
132	133	0,08	7,7998	2,6202	75						
128	134	0,16	0,6984	2,0024	0						
134	135	0,015	3,1264	2,3235	75						
135	136	0,185	3,1264	2,3235	0						
136	137	0,08	3,1264	2,3235	75						
137	138	0,13	3,1264	2,3235	0						
138	139	0,24	7,8975	2,5062	0						
139	140	0,12	7,8975	2,5062	112,5						
140	141	0,125	5,5151	2,7124	0						
141	142	0,15	5,5151	2,7124	75						
141	143	0,095	5,5151	2,7124	150						
139	144	0,08	7,8975	2,5062	0						
144	145	0,04	7,8975	2,5062	112,5						
144	146	0,12	7,8975	2,5062	75						
136	147	0,16	3,1264	2,3235	75						
147	148	0,2	3,1264	2,3235	112,5						
148	149	0,29	3,1264	2,3235	45						
134	150	0,18	0,6984	2,0024	0						
150	151	0,04	0,6984	2,0024	75						
150	152	0,14	0,6984	2,0024	0						
152	153	0,04	0,6984	2,0024	0						
153	154	0,1	7,7998	2,6202	45						
154	155	0,04	7,7998	2,6202	75						
153	156	0,04	0,6984	2,0024	0						

Apêndice B

O Modelo do Capacitor

A consideração de que o capacitor é uma carga de potência constante se afasta da realidade, visto que de fato, o capacitor se comporta como uma carga de impedância constante. O valor de potência reativa especificada para o capacitor se refere à tensão nominal de operação. Mas à medida que se trabalha fora deste valor de tensão nominal, o capacitor fornece uma quantidade de reativos diferente e esta muda com o quadrado da tensão de operação do sistema, de acordo com a formulação a seguir.

Considere a potência de uma carga dada por:

$$S = \frac{v^2}{Z} \Rightarrow S \cong Q \Rightarrow Q = \frac{v^2}{Z} \quad (\text{B.1})$$

pois praticamente toda a potência do capacitor é reativa. Considerando o capacitor de impedância constante e supondo uma mudança no valor da tensão que passa do valor nominal v , para um novo valor αv , temos:

$$Q_e = \frac{(\alpha v)^2}{Z} = \alpha^2 \cdot \frac{v^2}{Z} \Rightarrow Q_e = \alpha^2 \cdot Q \quad (\text{B.2})$$

sendo:

$$\alpha = \frac{v_e}{v} \quad (\text{B.3})$$

em que:

Q_e é o valor efetivo de potência reativa que o capacitor irá fornecer;

v é o valor da tensão nominal de operação;

Z é a impedância do capacitor;

Q é o valor de potência reativa especificado para a tensão nominal de operação;

v_e é o valor efetivo de tensão que o capacitor trabalha;

α é o fator aplicado para corrigir a potência reativa.

Como normalmente a tensão de operação está abaixo da nominal, o mais freqüente é que o capacitor forneça menos potência reativa do que a especificada ($\alpha < 1$). A situação se inverte quando a tensão de operação está acima da nominal ($\alpha > 1$), fato que ocorre em alguns trechos a jusante do ponto de instalação de reguladores de tensão.

Apêndice C

Bancos de Reguladores de Tensão: Delta Fechado e Delta Aberto

C.1 Banco de Reguladores Monofásicos em Delta Fechado

O banco de reguladores monofásicos é a configuração mais usual em sistemas de distribuição trifásicos. Na configuração delta fechado a faixa de regulação é 50% maior. Isso significa que se as unidades monofásicas têm faixa de regulação de $\pm 10\%$, cada uma, a regulação efetiva do banco é de $\pm 15\%$.

Outra vantagem é que se uma das unidades monofásicas sair de operação por falha, as outras duas podem se manter em operação na configuração delta-aberto, mantendo ainda os níveis de tensão regulados, limitando-se, contudo, a faixa de regulação, que será novamente de $\pm 10\%$. A figura C.1 mostra um banco de reguladores na configuração delta fechado.

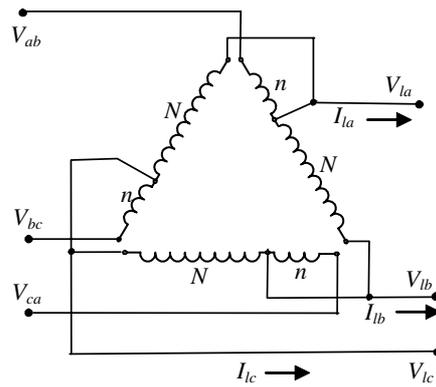


Figura C.1 - Banco de reguladores monofásicos ligados em delta fechado.

A seguir são mostradas as equações que relacionam o módulo da tensão e ângulo na saída do banco de reguladores monofásicos ligados em delta fechado, de acordo com o degrau d utilizado.

$$V = v\sqrt{(1 + 3a + 3a^2)} \quad (\text{C.1})$$

$$\Delta = \tan^{-1}\left(\frac{a\sqrt{3}}{2 + 3a}\right) \quad (\text{C.2})$$

sendo:

$$a = d\left(\frac{0,1}{16}\right) \quad (\text{C.3})$$

v → módulo da tensão de entrada do banco;

V → módulo da tensão de saída do banco;

d → degrau de operação;

Δ → defasagem no ângulo da tensão na saída do banco

No degrau mínimo (-16), a tensão na saída do banco é 15% menor que na entrada. e a defasagem no ângulo da tensão é de $-5,8^\circ$ (Bishop et al, 1996). Já no degrau máximo (+16), a tensão na saída do banco é 15% maior e a defasagem no ângulo da tensão é $+4,3^\circ$.

Esta defasagem no ângulo da tensão de saída, em relação ao ângulo de tensão de entrada, do banco de reguladores em delta fechado, é pequena e não afeta o fluxo de potência ativa em alimentadores radiais de distribuição (Gross, 1986).

Dois tipos de circuito delta fechado são possíveis: *lagging* e *leading*. Estes termos se referem ao ângulo de fase da corrente em relação à tensão. Para a configuração delta *lagging*, todas as unidades monofásicas têm a corrente atrasada da tensão em $(30^\circ + \phi)$ e para a configuração delta *leading*, todas as unidades monofásicas têm a corrente adiantada da tensão em $(30^\circ - \phi)$, sendo ϕ o ângulo de fator de potência da carga.

C.2 Banco de Reguladores Monofásicos em Delta Aberto

A configuração em delta aberto, vista na figura C.2, tem a vantagem de manter o sistema operando apesar de ter uma unidade monofásica a menos. Neste caso, se antes, na configuração delta fechado, a faixa de regulação do banco era de $\pm 15\%$, em delta aberto, a faixa de regulação do banco volta a ser de $\pm 10\%$, o mesmo de cada unidade monofásica e não há defasagem no ângulo da tensão de saída do banco em relação ao ângulo de tensão de entrada. Entretanto, ainda ocorre rotação de fase entre corrente e tensão de saída do banco, sendo que uma unidade monofásica tem a corrente atrasada da tensão em $(30^\circ + \phi)$, enquanto que a outra unidade tem a corrente adiantada da tensão em $(30^\circ - \phi)$.

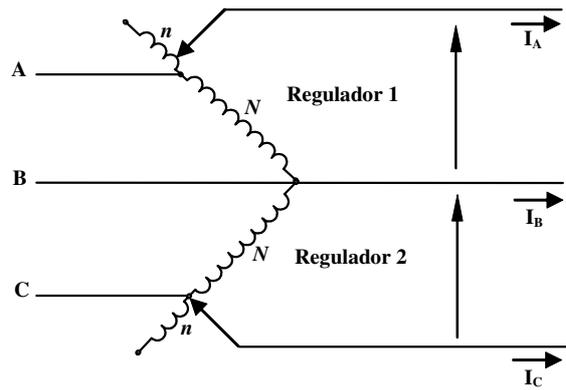


Figura C.2 - Banco de reguladores monofásicos ligados em delta aberto.

Portanto, em delta aberto, um regulador trabalha adiantado e o outro trabalha atrasado. A relação entre tensão de entrada e saída no banco de reguladores em delta aberto é mostrada na equação (C.4):

$$V = (1 + a)v \quad (\text{C.4})$$

em que:

$a \rightarrow$ valor do degrau de operação, conforme definido na equação (2.5);

$v \rightarrow$ módulo da tensão de entrada do banco;

$V \rightarrow$ módulo da tensão de saída do banco;

C.3 Potência dos Reguladores de Tensão

A determinação da potência de um regulador de tensão é realizada segundo a equação (C.5), apresentada em (Westinghouse, 1965) e implementada com êxito em (Almeida *et al*, 2005a, 2007b e 2008). Esta formulação é para banco de reguladores monofásicos, ligados em delta aberto ou fechado, conforme apresentado a seguir.

A potência nominal em kVA, de um regulador de tensão é apenas a transformada por ele e não a potência pelo circuito no ponto em que está instalado. O cálculo é feito considerando o máximo percentual de regulação do regulador. Desta forma, temos:

$$S_R = \frac{\%R}{100\sqrt{3}} S \quad (\text{C.5})$$

em que:

S_R → potência calculada de cada unidade monofásica, em kVA;

$\%R$ → percentual de regulação do banco;

S → potência total trifásica na barra em kVA;

Não há diferença na potência de cada unidade monofásica quando se muda de banco ligado em delta aberto para delta fechado, mas muda a faixa de regulação (de $\pm 10\%$ para $\pm 15\%$)

Tabela C.1 – Dados de Reguladores de Tensão Monofásicos.

ADD-AMP Capabilities of 60 Hz Ratings

Rated Volts	Rated kVA	Load Current Ratings (Amperes) ¹				
		Regulation Range				
		±10%	±8 3/4%	±7 1/2%	±6 1/4%	±5%
2500	25	100	110	120	135	160
	50	200	220	240	270	320
	75	300	330	360	405	480
	100	400	440	480	540	640
	125	500	550	600	668	668
	167	668	668	668	668	668
	250	1000	1000	1000	1000	1000
	333	1332	1332	1332	1332	1332
416.3	1665	1665	1665	1665	1665	
5000	25	50	55	60	68	80
	50	100	110	120	135	160
	100	200	220	240	270	320
	125	250	275	300	336	400
	167	334	367	401	451	534
	250	500	550	600	668	668
	333	668	668	668	668	668
	416.3	833	833	833	833	833
7620	38.1	50	55	60	68	80
	57.2	75	83	90	101	120
	76.2	100	110	120	135	160
	114.3	150	165	180	203	240
	167 ²	219/232	241/255	263/278	296/313	350/370
	250 ²	328/347	361/382	394/417	443/469	525/556
	333 ²	438/464	482/510	526/557	591/625	668
	416.3 ²	548/580	603/638	658/668	668	668
	500 ²	656/668	668	668	668	668
	667 ²	875/926	875/926	875/926	875/926	875/926
	833 ²	1093/1157	1093/1157	1093/1157	1093/1157	1093/1157
13800	69	50	55	60	68	80
	138	100	110	120	135	160
	207	150	165	180	203	240
	276	200	220	240	270	320
	414	300	330	360	405	480
	500	362	398	434	489	579
	552	400	440	480	540	640
	667	483	531	580	652	668
	833	604	664	668	668	668
	14400	72	50	55	60	68
144		100	110	120	135	160
288		200	220	240	270	320
333		231	254	277	312	370
416		289	318	347	390	462
432		300	330	360	405	480
500		347	382	416	468	555
576		400	440	480	540	640
667		463	509	556	625	668
720		500	550	600	668	668
833		578	636	668	668	668
19920	50	25.1	28	30	34	40
	100	50.2	55	60	68	80
	200	100.4	110	120	135	160
	333	167	184	200	225	267
	400	200.8	220	240	270	320
	500	250	275	300	338	400
	667	335	369	402	452	536
	833	418	460	502	564	668
34500	50	50	55	60	68	80
	100	100	110	120	135	160
	150	150	165	180	203	240
	200	200	220	240	270	320

Fonte: catálogo do fabricante *Cooper Power Systems*