

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Engenharia de Sistemas

Área de concentração: Automação

**Redução de Perdas Técnicas em Redes Primárias de
Distribuição de Energia Elétrica**

Aluna: Cristiane Maria Alves Pissarra Fernandes

Orientador: Prof. Dr. Christiano Lyra Filho

Banca Examinadora:

1. Prof. Dr. Denis Vinicius Coury - EESC/USP-São Carlos
2. Prof. Dr. Nelson Kagan - POLI/USP-São Paulo
3. Prof. Dr. André Luiz Morelato França - FEEC/UNICAMP
4. Prof. Dr. Anésio dos Santos Júnior - FEEC/UNICAMP
5. Prof. Dr. Fujio Sato - FEEC/UNICAMP

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Campinas, Junho de 2003.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

F391r Fernandes, Cristiane Maria Alves Pissarra
 Redução de perdas técnicas em redes primárias de
 distribuição de energia elétrica / Cristiane Maria Alves
 Pissarra Fernandes. --Campinas, SP: [s.n.], 2003.

 Orientador: Christiano Lyra Filho.
 Tese (doutorado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
 Computação.

 1. Sistemas de energia elétrica. 2. Sistemas de energia
 elétrica - Distribuição. 3. Energia elétrica - Distribuição.
 4. Otimização combinatória. I. Lyra Filho, Christiano.
 II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
 Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Resumo

Este trabalho apresenta um conjunto de inovações para resolver o problema de redução de perdas através de reconfigurações em sistemas reais de distribuição de energia elétrica. As inovações incluem um conjunto de desenvolvimentos específicos para tratar sistemas de distribuição de grande porte. As principais contribuições estão associadas a procedimentos de buscas informadas em grafos, da área de inteligência artificial, métodos de otimização não-linear para redes e heurísticas baseadas em características próprias do problema. O trabalho apresenta também uma nova abordagem para redução de perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica através de estratégia conjunta de reconfigurações e instalação de capacitores em pontos adequados da rede. De forma análoga ao problema de redução de perdas por reconfigurações, estas técnicas foram desenvolvidas para abordar o problema em sistemas reais de grande porte.

Abstract

This thesis presents a set of innovations for the solution of the loss reduction problem in real primary distribution systems. They include a set of specified developments to deal with large scale distribution systems. The main contributions are associate with informed searches in graphs, from the area of artificial intelligence, optimization of non-linear functions in networks flows and heuristics based on problem characteristics. The work also presents a new methodology for loss reduction in distribution systems problem through an integrated strategy of networks reconfigurations and capacitor settings installed in adequate spots. Similar to the loss reduction problem by reconfigurations strategies, these techniques were developed to deal with real large scale problems.

*Aos meus pais Antonio e Elisabete,
ao Márcio,
ao Fábio,
ao Pedro,
com todo o carinho.*

*Meu coração tropical está coberto de neve, mas
Ferve em seu cofre gelado, e a voz vibra e a mão escreve: Mar
Bendita a lâmina grave, que fere a parede e traz
as febres loucas e breves, que mancham o silêncio e o cais
Roseirais! Nova granada de Espanha! Por você, eu, teu corsário preso
Vou partir a geleira azul da solidão
E buscar a mão do mar
Me arrastar até o mar
Procurar o mar
Mesmo que eu mande em garrafas, mensagens por todo o mar
Meu coração tropical, partirá esse gelo e irá
Com as garrafas de naufrago e as rosas, partindo o ar
Nova granada de Espanha, e as rosas partindo o ar.*

João Bosco - 1975

Corsário

Agradecimentos

Pelo que penso, nunca realizamos um trabalho solitário pois somos sempre auxiliados seja com idéias, com compreensão, com conselhos ou simplesmente com um silêncio caridoso. Na realização deste trabalho tive apoio de diversas pessoas queridas. É com imensa alegria que agradeço:

aos meus pais, Elisabete e Antonio, pois não esqueço que devo a eles muito do que sou, que sou parte deles e eles são parte de mim. Tiveram paciência, compreensão, amor e dedicação, principalmente nos momentos mais difíceis.

Ao Christiano, por ter me proposto um tema tão interessante e com o qual me identifiquei. A sua atitude de orientador, e muito mais de amigo, contribuiu imensamente para o desenvolvimento de auto-confiança e autonomia no meu trabalho acadêmico. Enfim, pelo seu positivismo e amizade contagiantes.

Ao Márcio, por ser o companheiro, amigo, confidente e conselheiro, sem medir tempo nem esforços. Por me fazer sentir tão amada e respeitada. Pelo seu esforço ímpar em mostrar que tudo tende a dar certo.

Ao Fábio, pelo irmão que é e pela nossa amizade que supera qualquer circunstância; à Andréa pela nova amizade e convivência. À Morgana, pelos bons momentos proporcionados por debates sobre temas instigantes. À Conceição, por sua alegria e ao Antonio (in memoriam).

Aos amigos, “companheiros”, Alessandra e Renato, por me ouvirem tantas e tantas vezes, demonstrando dedicação e gentileza sem limites e ao afilhado Pedro, que preenche os momentos da vida com deliciosa simplicidade, bom humor e “marotisse” de menino. À Claudia e Denilson.

Ao Celso, Edilson, Fran, Joana, Luciana, Cintia, Eduardo, José, Vinícius, Marcelo, Luiz e a todos do Densís, que de uma forma ou outra, me ajudaram em situações diversas e nos momentos necessários. À Márcia Fracaro, Noêmia Benatti, Maria José Pinheiro e aos funcionários da FEEC.

À todos os amigos que fiz e com quem convivi durante o período que estive na UNICAMP e a todos os professores que participaram na minha formação. À Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), em especial aos engenheiros René Manhães e Francisco Bassotelli.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo suporte financeiro dado, no período de realização deste trabalho.

Índice

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiv
Apresentação	1
1 Introdução	3
1.1 Sistema de Distribuição de Energia Elétrica	3
1.2 Perdas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica	4
1.3 Alternativas para Redução de Perdas Técnicas em Redes Primárias de Distribuição Elétrica	6
1.3.1 Reconfiguração de Redes	6
1.3.2 Localização e Dimensionamento de Capacitores	9
1.4 Abordagens para o Problema de Redução de Perdas Técnicas	9
1.4.1 Procedimento de Abertura Sequencial de Chaves	11
1.4.2 Procedimento de Troca de Ramos	13
1.4.3 Abordagem por Construção	15
1.4.4 Otimização Tradicional (programação matemática)	16
1.4.5 Otimização Combinatória	17
1.4.6 Computação Evolutiva	18

1.4.7	Redes Neurais	19
1.4.8	Sistemas Especialistas	20
1.4.9	Estratégias Fuzzy	21
1.4.10	Buscas Informadas	23
1.4.11	Reconfiguração de Redes e Instalação de Capacitores	25
1.5	Principais Contribuições do Trabalho	30
2	Modelagem do Problema de Minimização de Perdas em Redes de Distribuição de Energia Elétrica	31
2.1	Principais Componentes das Redes de Distribuição Simplificada	32
2.2	Representação das Redes de Distribuição por Grafos	33
2.2.1	Noções de Grafos	33
2.2.2	Grafos que Representam Redes de Distribuição Elétrica	35
2.3	Formulação do Problema de Redução de Perdas para Reconfiguração de Redes	37
2.4	Estratégia Geral de Solução do Problema de Redução de Perdas por Reconfiguração de Redes	41
3	Abordagem por Busca em Grafos	43
3.1	Buscas em Grafo	44
3.2	Procedimentos de Buscas Backtracking	46
3.2.1	A Busca Backtracking	46
3.2.2	A Busca Backtracing Informada	47
3.2.3	A Busca Backtracking Heurística	49
3.3	A Busca Heurística Modular	52
3.4	Ajuste Fino por Troca de Ramos	56
4	Solução do Problema Relaxado e Procedimentos de Otimização para Redes Reais	59

4.1	Solução do Problema de Otimização Relaxado $(\mathcal{P}_1)_r$	60
4.1.1	O Método do Gradiente Reduzido para Fluxos em Redes	60
4.2	Solução de Problemas Sucessivos	66
4.2.1	Abordagem por Penalização	67
4.2.2	Abordagem por Ampliação das Condições de Otimalidade dos Fluxos	68
4.2.3	Resultados de Comparação entre as Duas Abordagens	74
4.3	Procedimentos de Otimização para Redes com Arcos de Diferentes Categorias	78
4.3.1	Classificação do Conjunto de Arcos	78
4.3.2	Distinção entre Arcos e Chaves na Busca Heurística Modular	79
4.3.3	Distinção entre Arcos e Chaves na Preparação do Problema Relaxado $(\mathcal{P}_1)_r$ para Estados Sucessores	83
4.3.4	Distinção entre Arcos e Chaves no Ajuste Fino por Troca de Ramos	86
5	Estudos de Casos I	89
5.1	Características das Redes Reais para Testes	89
5.2	Resultados Obtidos	91
6	O Método Reconfigurador de Redes e a Aplicação do Metaconhecimento	103
6.1	Aplicação Seletiva do Método do Gradiente Reduzido para Fluxos em Redes	104
6.1.1	Estudos de Casos II	111
6.2	Tipos de Ramificações	114
6.2.1	Testes com Ramificação Fixa	115
6.2.2	Testes com Ramificação Variável	116
6.3	Refinamentos na Função de Estimativa de Perdas $h(n)$	119
6.3.1	Interpolação Linear	119
6.3.2	Interpolação Quadrática	120
6.4	Estudos de Casos III	121
6.4.1	Testes com Interpolação Linear	121

6.4.2	Testes com Interpolação Quadrática	124
6.4.3	Testes com Interpolação Linear e Aplicação Seletiva do GR	125
6.4.4	Testes com Interpolação Quadrática e Aplicação Seletiva do GR	127
6.5	Conclusões	129
7	Conclusões	131
A	Reconfiguração e Instalação de Capacitores para Redução de Perdas em Redes Reais de Distribuição de Energia Elétrica	135
A.1	O Problema de Localização e Dimensionamento de Capacitores	136
A.2	Abordagens para o Problema de Redução de Perdas por Reconfigurações e Instalação de Capacitores	138
A.3	Estudos de Casos	142
A.3.1	Testes para Redução de Perdas em Redes através de uma Aplicação Sequencial dos Métodos de Otimização	144
A.3.2	Testes para Redução de Perdas em Redes através da Estratégia Unificada 1	147
A.3.3	Testes para Redução de Perdas em Redes através da Estratégia Unificada 2	152
A.4	Conclusões	160
B	Publicações Vinculadas ao Trabalho	165
C	Anexo	167
	Bibliografia	175

Lista de Figuras

1.1	Unifilar de uma pequena rede de distribuição primária	7
1.2	Nova configuração de rede ao se abrir o disjuntor CHS34	8
2.1	Exemplo de rede de distribuição primária simplificada	32
2.2	Exemplo de grafo (a) não orientado e (b) orientado	34
2.3	Exemplo de (a) caminho e (b) ciclo	34
2.4	Exemplo de (a) árvore e (b) matriz de incidência nó-arco para a árvore especificada em (a)	35
2.5	Apresentação de um trecho de rede e sua respectiva representação utilizando grafos	36
2.6	Grafo associado à rede de distribuição apresentada	37
2.7	Árvore associada ao grafo da rede de distribuição	38
2.8	Representação simplificada do grafo de uma rede de um alimentador	39
3.1	Árvore de busca para obtenção de solução de mínimas perdas	45
3.2	Exemplo de árvore de exploração da busca backtracking	47
3.3	Definição da função de avaliação para a busca backtracking heurística	50
3.4	Abertura sequencial de arcos como processo de busca em espaço de estados	54
3.5	Árvore de busca para $p = 2$, na busca heurística modular	55
3.6	Rede radial contendo um alimentador	56
3.7	Ajuste fino por troca de ramos	58

4.1	Exemplo de grafo para representação das listas O e D	63
4.2	Árvore para representação das listas de armazenamento	65
4.3	Preparação do problema $(\mathcal{P}_1)_r$ para um estado sucessor	69
4.4	Otimalidade dos fluxos em árvores	70
4.5	(a) Configuração inicial da rede e (b) aplicação do método do gradiente reduzido para a obtenção dos fluxos ótimos	72
4.6	(c) Otimalidade dos fluxos em árvores: aplicação do conceito de movimentação de fluxos no ciclo, ao abrir-se o arco 4 e (d) obtenção da nova distribuição ótima de fluxos	73
4.7	(e) Otimalidade dos fluxos em árvores: aplicação do conceito de movimentação de fluxos no ciclo, ao abrir-se o arco 6 e (f) obtenção da nova distribuição ótima de fluxos	73
4.8	Sub-árvores e co-ciclo associado ao arco 3 e à árvore \mathcal{G}'	80
4.9	Árvore \mathcal{G}' associada a configuração inicial de uma rede real. Condição de manobra: apenas chaves à óleo	81
4.10	(a) Sub-árvores associadas a árvore \mathcal{G}' da Figura 4.9, criadas a partir da retirada da chave 4 e (b) ilustração de troca de base: saída da chave 4 (por saturação) e entrada da chave 10	82
4.11	(a) Rede com um ciclo a ser desfeito: ilustração de troca de base na preparação do problema relaxado e (b) dissolução do último ciclo da rede com abertura da chave 9	84
4.12	(a) Rede radial obtida pela aplicação da BHM na rede representada pela Figura 4.9 e (b) ajuste fino por troca de ramos aplicado à rede radial apresentada em (a)	87

6.1	Comportamento das soluções em cada nível: curvas pontilhadas - soluções sem envenenamento; curvas sólidas - soluções com envenenamento. 1º conjunto de testes	105
6.2	Comportamento das soluções em cada nível: curvas pontilhadas - soluções sem envenenamento; curvas sólidas - soluções com envenenamento. 2º conjunto de testes	106
6.3	Comportamento das soluções em cada nível: curvas pontilhadas - soluções sem envenenamento; curvas sólidas - soluções com envenenamento. 3º conjunto de testes	107
6.4	Sequência de nós envolvidos para decisão na aplicação seletiva do método do gradiente reduzido para fluxos em redes	109
6.5	Síntese das idéias para restrições e esforço com a solução do problema de fluxo de custo mínimo	111
6.6	Árvore de buscas com ramificação fixa e $p = 4$ na busca heurística modular .	115
6.7	Ilustração do conceito de ramificação variável com $p = 4$	117
6.8	Estimativa da função $h(n)$ por interpolação linear	119
6.9	Estimativa da função $h(n)$ por interpolação quadrática	120
A.1	Estratégia cíclica para resolução do problema de redução de perdas desenvolvida por Peponis e co-autores (1995)	139
A.2	Estratégias unificadas para o problema de redução de perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica	140
A.3	Estratégia sequencial para o problema de redução de perdas em redes	145

Lista de Tabelas

1.1	Produção, consumo e perdas de energia elétrica no Brasil, em TWh	4
1.2	Percentual das perdas anuais de energia no setor elétrico	5
1.3	Percentuais comparativos de perdas técnicas e comerciais de energia elétrica - Eletropaulo	6
4.1	Representação das listas P_A , P_P , P_F e P_N para a árvore da Figura 4.2	64
4.2	Características das redes utilizadas nos testes de comparação entre o pro- cedimento de penalização e o procedimento de ampliação das condições de otimalidade dos fluxos	75
4.3	Comparação dos resultados obtidos com a aplicação do procedimento pena- lizador e o procedimento de movimentação por ampliação das condições de otimalidade dos fluxos	76
4.4	Comparação entre as manobras a serem realizadas para a obtenção das confi- gurações finais associada as reduções de perdas obtidas na Tabela 4.3 para a Rede C	77
5.1	Características das redes disponíveis para testes	90
5.2	Número de arcos do tipo chave nas redes disponíveis para testes	90
5.3	Resultados obtidos para o 1º conjunto de testes	93
5.4	Manobras a serem realizadas para a obtenção da configuração final associada à redução de perdas obtida na Tabela 5.3 - Rede E - 1º conjunto de testes . . .	94

5.5	Resultados obtidos com a aplicação da busca heurística modular (com $p = 19$), seguida da aplicação do ajuste fino por troca de ramos - Rede C	95
5.6	Comparação entre as manobras a serem realizadas para a obtenção das configurações associadas às reduções de perdas obtidas nas Tabelas 5.3 e 5.5 - Rede C	95
5.7	Resultados obtidos para o 2º conjunto de testes	96
5.8	Manobras a serem realizadas para a obtenção da configuração final associada à redução de perdas obtida na Tabela 5.5 - Rede E - 2º conjunto de testes . .	98
5.9	Resultados obtidos para o 3º conjunto de testes	99
5.10	Manobras a serem realizadas para a obtenção da configuração final associada à redução de perdas obtida na Tabela 5.7 - Rede E - 3º conjunto de testes . .	100
6.1	Resultados obtidos com a aplicação da busca heurística modular com avaliação da aplicação seletiva do método do gradiente reduzido para fluxos em redes. Parâmetro de ramificação $p = 1$	113
6.2	Resultados obtidos com a aplicação da busca heurística modular com ramificação fixa e $p = 4$	115
6.3	Resultados obtidos com a aplicação da busca heurística modular com ramificação variável ($p = 4$) e $h(n) = 0.0$	117
6.4	Resultados obtidos com a aplicação da busca heurística modular com ramificação fixa ($p = 4$) e estimativa da função $h(n)$ por interpolação linear	121
6.5	Resultados obtidos com a aplicação da busca heurística modular com ramificação variável ($p = 4$) e estimativa da função $h(n)$ por interpolação linear . .	123
6.6	Resultados obtidos com a aplicação da busca heurística modular com ramificação variável ($p = 4$) e estimativa da função $h(n)$ por interpolação quadrática	124

6.7	Resultados obtidos com a aplicação da busca heurística modular com ramificação variável ($p = 4$), estimativa da função $h(n)$ por interpolação linear e aplicação seletiva do método do gradiente reduzido para fluxos em redes . . .	126
6.8	Resultados obtidos com a aplicação da busca heurística modular com ramificação variável ($p = 4$), estimativa da função $h(n)$ por interpolação quadrática e aplicação seletiva do método do gradiente reduzido para fluxos em redes . .	128
A.1	Características das redes - Correção das perdas iniciais (FC=0,6)	143
A.2	Tabela de custos de bancos de capacitores fixos	144
A.3	Tabela de Resultados - Aplicação da Abordagem Sequencial	147
A.4	Tabela de Resultados - Aplicação do Método LA1	148
A.5	Tabela de Resultados - Aplicação do Método LA1 - Variação do orçamento .	150
A.6	Tabela de Resultados - Aplicação do Método LA1 - Variação do custo de energia	151
A.7	Rede C - Perdas iniciais: 181,45 kW; orçamento: ilimitado	154
A.8	Rede C - Perdas iniciais: 181,45 kW; orçamento: R\$ 15.000,00	154
A.9	Rede F - Perdas iniciais: 699,16 kW; orçamento: ilimitado	154
A.10	Rede F - Perdas iniciais: 699,16 kW; orçamento: R\$ 20.000,00	155
A.11	Rede F - Perdas iniciais: 699,16 kW; orçamento: R\$ 40.000,00	155
A.12	Rede K - Perdas iniciais: 901,87 kW; orçamento: ilimitado	155
A.13	Rede K - Perdas iniciais: 901,87 kW; orçamento: R\$ 20.000,00	156
A.14	Rede K - Perdas iniciais: 901,87 kW; orçamento: R\$ 40.000,00	156
A.15	Rede C - Perdas iniciais: 181,45 kW; orçamento: R\$ 1.500,00	157
A.16	Rede F - Perdas iniciais: 699,16 kW; orçamento: R\$ 3.500,00	158
A.17	Rede K - Perdas iniciais: 901,87 kW; orçamento: R\$ 4.000,00	158
A.18	Tabela de Resultados - Aplicação do Método LA2 - Rede135	159
A.19	Localização e capacidade dos capacitores a serem instalados na Rede135 . . .	159
A.20	Especificações dos nós do sistema de distribuição Rede135	161

A.21 Especificidades das chaves do sistema de distribuição Rede135 162

Apresentação

Energia é continuamente dissipada em sistemas de potência devido à presença de resistências nas linhas de transmissão e distribuição. No Brasil, as perdas são de aproximadamente 15% da energia total produzida no país, onde 7% são perdas na transmissão e 8% são perdas na distribuição (Cavellucci, 1998).

A crescente automação dos sistemas de distribuição traz a possibilidade de se alterar mais facilmente a configuração da rede através de manobras de abertura e fechamento de chaves. O conjunto destas manobras, que caracterizam o problema de reconfiguração de redes, viabilizam ações que permitem redução de perdas, mantendo a condição de radialidade do sistema.

Este trabalho apresenta um conjunto de inovações para a resolução do problema de redução de perdas através de reconfigurações em sistemas reais de distribuição de energia elétrica, com desenvolvimentos específicos para abordar sistemas de grande porte. As idéias estão apoiadas em procedimentos de buscas informadas em grafos da área de inteligência artificial propostas por Cavellucci (1998), métodos de otimização não-linear para redes e heurísticas baseadas em características particulares do problema.

Outra alternativa para se obter redução de perdas é a instalação de capacitores em pontos adequados da rede, proporcionando geração de energia reativa na proximidades das cargas. Este trabalho explora também a unificação dos problemas de reconfiguração de redes e de instalação de capacitores como abordagem integrada para redução de perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica. De forma análoga ao problema de redução de perdas por reconfigurações a abordagem integrada envolve um conjunto de desenvolvimentos específicos para abordar problemas reais de grande porte.

O trabalho está dividido em seis capítulos. O Capítulo 1 faz uma breve descrição de sistemas de distribuição e discute as principais abordagens existentes na literatura sobre perdas através de reconfigurações. Faz também uma revisão bibliográfica sobre o uso de capacitores para redução de perdas em redes primárias de distribuição.

O Capítulo 2 apresenta uma descrição do modelo de grafos para o sistema de distribuição de energia elétrica e a formulação do problema de redução de perdas por reconfigurações de redes. Apresenta também, em grandes linhas, a estratégia para abordagem do problema.

O Capítulo 3 discute os métodos de buscas informadas em grafos (Cavellucci, 1998) que fornecem a base conceitual para a abordagem do problema de redução de perdas por reconfigurações. Apresenta também o método de busca local de Civanlar (1988), utilizando o algoritmo desenvolvido por Baran e Wu (1989a).

O Capítulo 4 detalha a nova perspectiva para tratar o problema de redução de perdas em sistemas de distribuição, através de reconfigurações de redes. O capítulo apresenta também os procedimentos necessários que adequaram os métodos desenvolvidos no Capítulo 3 para a aplicação em redes reais.

O Capítulo 5 apresenta estudos de casos sobre a aplicação da metodologia desenvolvida no trabalho, envolvendo um conjunto de 11 redes reais de dimensão grande.

O Capítulo 6 apresenta um conjunto de desenvolvimentos específicos para a solução do problema de redução de perdas por reconfigurações em redes de grande porte. Esses desenvolvimentos são caracterizados como "metaconhecimento" associado ao problema. São apresentados estudos de casos sobre a aplicação da metodologia em um conjunto de redes reais.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões e comentários finais.

O Apêndice A discute contribuições para a abordagem integrada do problema de redução de perdas por reconfigurações de redes e instalação de capacitores. Apresenta também estudos de casos com aplicação da abordagem integrada a redes reais.

O Apêndice B contém uma cópia do trabalho *An Evolutionary Approach for Capacitor Placement in Distribution Networks* de (Mendes et al., 2002) que apresenta em detalhes o algoritmo de Localização de Capacitores, utilizado nas abordagens desenvolvidas no Apêndice A.

O Apêndice C contém uma lista de publicações vinculadas ao trabalho.

Capítulo 1

Introdução

Os sistemas de energia elétrica têm por objetivo fundamental a geração, transmissão e distribuição de potência a vários tipos de cargas existentes com a melhor qualidade possível. Perdas de energia presentes durante o processo são indesejáveis, tanto pelo lado técnico como econômico. Em sistemas elétricos as perdas de energia são causadas pelas resistências nas linhas e equipamentos dos sistemas de transmissão e distribuição.

Este trabalho concentra-se no problema de reduzir as perdas de energia presente nos sistemas de distribuição elétrica.

1.1 Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

O sistema de distribuição é dividido em rede primária e rede secundária. A rede primária contém os alimentadores e equipamentos de manobra, proteção e transformação. A rede secundária é formada pelo conjunto de condutores que transportam a energia dos transformadores de distribuição até os pontos de consumo de energia (cargas) (Elgerd, 1977).

Usualmente as redes são operadas na forma radial, isto é, não são permitidas formações de anéis. A redução de perdas traz também benefícios adicionais, como aumento da vida útil dos equipamentos e também uma melhora nos perfis de tensões.

1.2 Perdas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Valores de referência para perdas totais num sistema de energia elétrica, na literatura internacional, são em torno de 7%, sendo 2% na transmissão e 5% na distribuição (Buch et al., 1982). No Brasil as perdas no sistema de potência são de aproximadamente 15% da energia total produzida no país, onde 7% são perdas na transmissão e 8% são perdas na distribuição (Cavellucci, 1998).

As perdas totais no sistema podem ser divididas em perdas comerciais e perdas técnicas. As perdas comerciais correspondem à energia entregue ao consumidor, mas não computada no faturamento da empresa de distribuição. As perdas técnicas são as perdas obtidas no transporte e em equipamentos da rede e são inerentes ao sistema. A Tabela 1.1 apresenta uma evolução da produção, do consumo e das perdas de energia elétrica no Brasil, no período de 1970 a 1997 (GCPS, 1998).

Tabela 1.1: Produção, consumo e perdas de energia elétrica no Brasil, em TWh

ANO	Produção	Consumo	Perdas (%)
1970	43	36	16,3
1980	131	114	13,0
1990	236	205	13,1
1997	321	277	13,7

Considerado elevado, se comparado a padrões internacionais, o índice de perdas técnicas pode ser justificado pelas características dos sistemas elétricos nacionais. Em particular à dimensão continental do Brasil e à predominância hidrelétrica, que resultam em longos sistemas de transmissão e elevados fluxos energéticos entre regiões (GCPS, 1998). A Tabela 1.2 apresenta os valores percentuais das perdas totais de energia de algumas empresas do setor elétrico brasileiro, divididas por regiões do país (GCPS, 1998) e (Cavellucci, 1998).

Tabela 1.2: Percentual das perdas anuais de energia no setor elétrico

Empresa	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
Norte							
ELETRONORTE	13,5	17,8	18,5	20,1	22,6	23,5	25,0
CELPA	18,4	18,9	18,2	20,3	22,2	24,6	25,0
Nordeste							
CEMAR	21,9	21,2	18,5	19,3	18,2	20,1	14,0
CEPISA	14,8	15,0	14,7	14,5	16,4	17,2	22,0
COELCE	12,0	12,8	11,6	11,5	11,4	12,6	12,0
COSERN	12,6	13,8	12,3	13,4	13,8	17,1	17,0
SAELPA	15,8	15,8	15,6	15,7	19,7	21,2	20,9
CELPE	12,1	11,9	12,7	13,0	13,1	14,8	15,7
CEAL	15,2	16,8	7,8	20,3	12,8	17,5	18,0
ENERGIPE	9,7	10,9	12,4	11,0	13,3	13,1	14,0
COELBA	11,4	12,2	10,0	14,6	13,8	14,2	15,1
Sudeste							
CEMIG	8,9	9,6	8,8	9,5	9,0	10,0	8,2
CERJ	17,3	17,7	16,4	16,5	19,4	23,4	25,2
CESP	4,3	3,4	2,4	3,0	3,3	3,7	3,4
CPFL	6,8	7,0	6,3	6,6	5,5	6,3	6,9
ELETROPAULO	6,4	7,5	6,4	7,4	8,3	7,9	8,7
ESCELSA	7,2	7,7	9,4	9,8	10,9	11,4	12,6
LIGHT	12,8	14,5	13,6	14,2	14,1	13,9	15,5
Centro-Oeste							
CEB	5,6	6,8	7,5	7,9	8,9	9,5	10,5
CELG	15,1	12,9	13,1	14,5	16,3	16,9	17,6
CEMAT	17,4	17,6	17,3	19,6	23,0	25,3	25,8
ENERSUL	15,6	14,6	13,4	16,2	15,3	14,9	14,8
Sul							
CEEE	12,5	12,3	11,1	11,2	11,4	11,0	11,8
CELESC	7,2	7,2	7,0	7,0	7,1	7,9	7,9
COPEL	7,5	7,4	6,8	8,7	7,4	6,7	6,2

A Tabela 1.3 apresenta uma comparação entre os valores percentuais de perdas técnicas e comerciais, fornecidos pela Eletropaulo (Travesso et al., 2002).

Tabela 1.3: Percentuais comparativos de perdas técnicas e comerciais de energia elétrica - Eletropaulo

ANO	Perdas Técnicas (%)	Perdas Comerciais (%)	Total (%)
1998	5,7	4,6	10,3
1999	5,5	3,2	8,7
2000	5,5	3,6	9,1
2001	5,5	5,8	11,3

Alguns procedimentos podem ser utilizados para se reduzirem as perdas técnicas no sistema primário de distribuição. Neste trabalho estamos particularmente interessados em procedimentos de reconfiguração de redes e de alocação de capacitores. É o que será apresentado a seguir.

1.3 Alternativas para Redução de Perdas Técnicas em Redes Primárias de Distribuição Elétrica

1.3.1 Reconfiguração de Redes

Reconfiguração de redes primárias é o procedimento de alterar a configuração da rede através da abertura e fechamento de chaves instaladas ao longo dos alimentadores. Esta alternativa pode ser usada como uma ferramenta de operação ou de planejamento do sistema. No caso de operação, para isolar trechos da rede onde haja necessidade de reparos ou de manutenção. No caso de planejamento, buscam-se configurações com o intuito de se obter uma estratégia ótima de operação com minimização de perdas.

A Figura 1.1 apresenta um diagrama unifilar, que representa de forma simplificada uma rede de distribuição. Esta rede possui duas subestações, aqui indicadas por SE1 e SE2. Possui sete chaves de interligação de linhas entre os alimentadores: cinco delas normalmente abertas, indicadas por S36, S37, S39, S40 e S41 e as outras duas normalmente fechadas, indicadas por S38 e S42. Todas podem ser manobradas para transferência de carga entre seus alimentadores. Possui trinta e seis blocos de carga (indicados por ponto) e trinta e três trechos de linha (numerados de 1 a 33) conectando os blocos de carga entre si e os conjuntos a cada alimentador. E ainda dois disjuntores, CHS34 e CHS35, presentes na saída de cada um dos alimentadores. Estes são normalmente fechados e podem ser abertos para se isolar faltas ou manter a estrutura radial da rede.

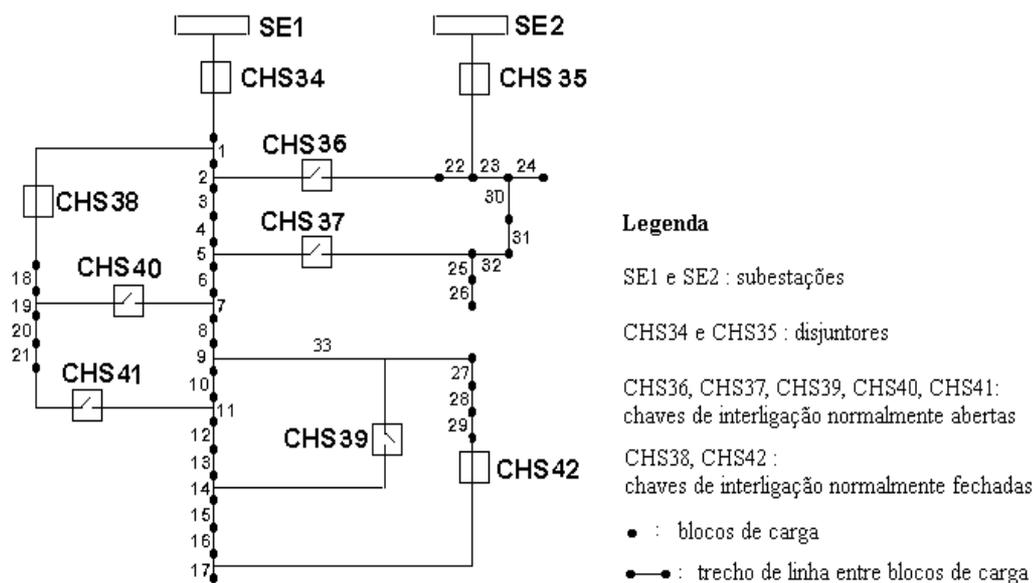


Figura 1.1: Unifilar de uma pequena rede de distribuição primária

Para ilustrar o procedimento de manobra de chaves e reconfiguração de redes, suponha na Figura 1.1 que a chave S37 fosse fechada: criou-se, neste exemplo, uma malha fechada no circuito elétrico da rede. Para se restituir a radialidade da rede, deve-se abrir uma chave

fechada ou desconectar um trecho de linha pertencente ao anel gerado composto pelas chaves e trechos: CHS34, 1, 2, 3, 4, 5, S37, 32, 31, 30, 23 e CHS35.

A Figura 1.2 ilustra a transferência de cargas entre as subestações SE1 e SE2, quando a chave CHS35 é aberta. As cargas entre os trechos de linhas 22, 23, 24, 25, 26, 30, 31 e 32, antes alimentadas por SE2, serão agora alimentadas por SE1.

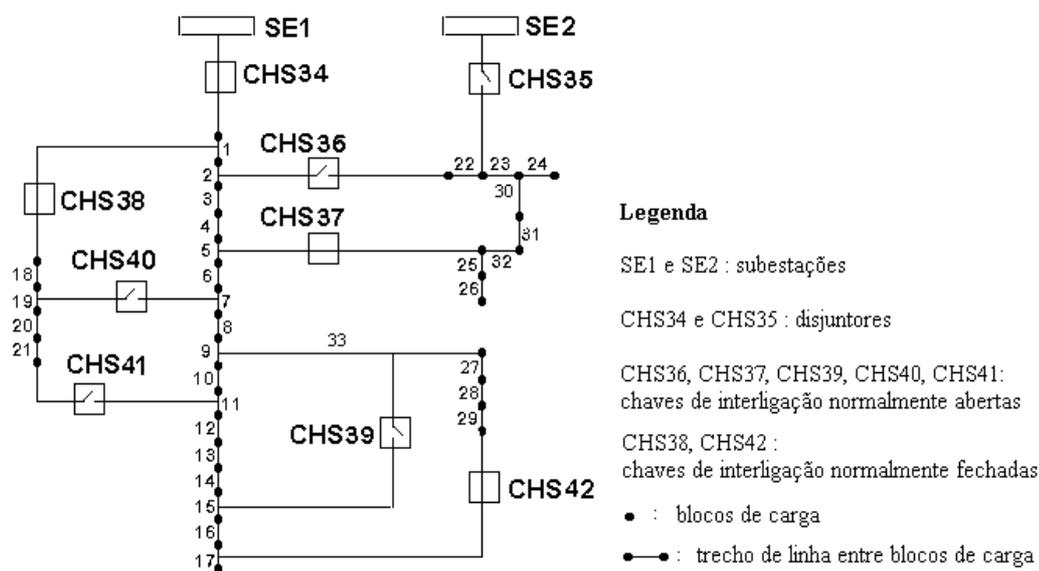


Figura 1.2: Nova configuração de rede ao se abrir o disjuntor CHS34

A possibilidade de reconfiguração de redes de distribuição através da alteração do estado das chaves proporciona uma grande quantidade de configurações possíveis. A cada configuração apresentada está associado um valor de perdas resistivas definido pelos fluxos de potência e perfis de tensão ao longo da rede.

O número de configurações possíveis cresce exponencialmente com a dimensão da rede, caracterizando um problema difícil de otimização combinatória. Para redes reais e de grande porte é inviável fazer-se a enumeração completa de todas as configurações possíveis.

1.3.2 Localização e Dimensionamento de Capacitores

Capacitores são fontes de energia reativa. O objetivo de sua aplicação em sistemas de potência é a compensação de energias reativas produzidas por cargas indutivas ou reatâncias nas linhas. Quando adequadamente utilizados, permitem a obtenção de um conjunto de benefícios correlatos que incluem a redução de perdas de energia, correção de perfis de tensões, controle de fluxos de potência e aumento da capacidade dos sistemas. Neste trabalho estamos interessados na instalação de capacitores para a redução de perdas. Estas podem ser reduzidas instalando-se capacitores em pontos adequados da rede, o que proporciona “geração de energia” reativa nas proximidades das cargas. Desta forma, diminui-se (ou no limite, elimina-se) os fluxos de corrente reativa nas linhas.

Na próxima seção serão apresentadas as principais abordagens registradas na literatura para o problema de redução de perdas (Lyra et al., 2000).

1.4 Abordagens para o Problema de Redução de Perdas Técnicas

O uso de procedimentos de reconfiguração de redes para encontrar a alternativa de mínimas perdas na operação de redes de distribuição de energia elétrica foi proposto pelos engenheiros A. Merlin e H. Back, da *Electricité de France*, em trabalho apresentado em 1975 na *5th Power System Computation Conference*, realizada em Cambridge, Inglaterra (Merlin and Back, 1975). Este trabalho foi um marco importante, motivando as pesquisas e implementações que se sucederam na área.

Merlin e Back (1975) além de identificarem a possibilidade de reduzir perdas em sistemas de distribuição através de um uso mais amplo das possibilidades de chaveamentos, apresentaram uma formulação matemática rigorosa para o problema, representando as cargas por demandas constantes de correntes, e desenvolveram duas abordagens de solução. A primeira, aproximada e mais eficiente do ponto de vista computacional, usa a distribuição ótima dos fluxos de potência em redes em anéis para construir progressivamente uma solução radial

de poucas perdas. A segunda, aplicável apenas em redes de pequeno porte, encontra uma configuração de mínimas perdas através do método *branch-and-bound*, para solução de problemas de otimização com variáveis inteiras. As abordagens para redução de perdas foram aplicadas por Merlin e Back em 7 redes (a maior delas com 138 nós, 202 arcos e 127 MW), onde se observa que o método aproximado obteve soluções muito boas, com pouco tempo de processamento. O método *branch-and-bound* não se mostrou promissor para os problemas maiores.

A obtenção de configurações de poucas perdas tiveram também outros aspectos positivos, observados pelos autores na análise das redes estudadas:

1. obtenção de uma boa distribuição de cargas entre os alimentadores;
2. aumento do período em que as redes permanecem usáveis, sem necessidade de investimento em expansão;
3. maior robustez em relação a falhas - diante de emergências, a restauração do suprimento de energia pode ser realizada com um número pequeno de chaveamentos.

Resultados tão promissores impulsionaram as pesquisas nos anos que se sucederam a publicação do trabalho de Merlin e Back, divulgadas em mais de 50 artigos publicados nas revistas científicas da área. Procurou-se elaborar novos métodos exatos (normalmente aplicados apenas em exemplos ilustrativos de tamanho muito pequeno), desenvolver alternativas de métodos aproximados (aplicáveis a redes de maior porte ou incorporando outros aspectos de representação) e estudar a aplicação de novos paradigmas para solução de problemas (computação evolutiva e redes neurais, por exemplo).

A maioria dos autores que procuraram fazer uma revisão da literatura sobre o problema de redução de perdas por reconfiguração em sistemas de distribuição separaram os métodos de resolução em: métodos de otimização, métodos que combinam heurísticas e otimização e métodos puramente heurísticos (Sarfi et al., 1996; Augugliaro et al., 1995). A caracterização

de métodos “puramente heurísticos” nos parece, no entanto, equivocada. Todos os métodos bem sucedidos usam, de forma explícita ou implícita, conceitos de otimização. Na discussão a seguir procura-se classificar as abordagens por características que permitam realçar suas especificidades do ponto de vista de implementações: abertura sequencial de chaves, troca de ramos, abordagens por construção, otimização tradicional, otimização combinatória, computação evolutiva, redes neurais, sistemas especialistas, álgebra nebulosa e buscas informadas - as abordagens por computação evolutiva, redes neurais e sistemas especialistas são algumas vezes agrupadas numa única categoria denominada “métodos baseados em inteligência artificial” (Sarfi et al., 1996).

1.4.1 Procedimento de Abertura Sequencial de Chaves

Os procedimentos de abertura sequencial de chaves, também chamados de “procedimentos em duas etapas” derivam do método aproximado proposto por Merlin e Back (1975); normalmente são considerados como “mistura” de otimização e heurísticas” (Sarfi et al., 1996). A “primeira etapa” desses métodos consiste no fechamento de todas as chaves e obtenção de uma solução de mínimas perdas em redes em anéis. Na “segunda etapa”, remove-se um anel pela abertura da chave com o menor fluxo de potência na solução de mínimas perdas. As duas etapas são repetidas sucessivamente, até a obtenção de uma solução radial.

As idéias propostas por Merlin e Back foram aperfeiçoadas por Shirmohammadi e Hong (1989) em trabalho desenvolvido na *Pacific Gas and Electric Company (PG&E)*. Essencialmente, os aperfeiçoamentos foram a utilização de fluxo de carga para corrente alternada e acompanhamento do atendimento às restrições de fluxos máximos e quedas de tensões, durante o processo de abertura sequencial de chaves.

Huddleston, Broadwater e Chandrasekaran (1990) propuseram uma abordagem simples, semelhante a abertura sequencial de chaves, onde a distribuição ótima dos fluxos nas redes

em anéis é obtida pela solução de um problema de otimização quadrática. Os autores apresentam sua abordagem, aplicada apenas em um exemplo didático, como uma evolução do método de troca de ramos (discutido a seguir), proposto por Civanlar e co-autores (1988). Aparentemente os autores desconheciam os trabalhos de Merlin-Back e Shirmohammadi-Hong (não estão citados nas suas referências) e sua contribuição teve pouco impacto nos trabalhos subsequentes. No entanto, a idéia de encontrar distribuições ótimas de fluxos em redes em anéis por métodos de otimização clássicos pode ser usada como uma alternativa aos fluxos de carga adotados por Merlin-Back e Shirmohammadi-Hong - foi o caminho adotado neste trabalho, inicialmente explorado por Cavellucci e Lyra (1997) em seus métodos de buscas informadas. A melhor abordagem estará associada à eficiência dos algoritmos específicos adotados na solução dos problemas de fluxos de carga ou de otimização.

Muitos autores implementaram, testaram e aperfeiçoaram a abordagem por abertura sequencial de chaves, seguindo a trilha aberta por Merlin-Back e Shirmohammadi-Hong (Wagner, Chikhani e Hackam (1991); Peponis, Papadopoulos e Hatziargyriou (1995), (1996); Borozan, Rajcic e Ackovski (1997); Lin e Chin (1998)). Normalmente, ressalta-se como aspecto positivo da abordagem o fato de que ela permite a obtenção de uma solução de poucas perdas sem a influência de informações prévias sobre configurações radiais conhecidas para operação da rede.

Como aspectos negativos, Wagner, Chikhani e Hackam (1991) relatam que obtiveram tempos de processamento maiores e pior situação de perdas nas soluções, em comparação com a abordagem de “troca de ramos” (discutida a seguir). Os maiores tempos de processamento são provavelmente consequência dos métodos de fluxos de carga adotados para obtenção da solução ótima para redes em anéis, como observado por Shirmohammadi-Hong em discussão que acompanha o trabalho de Wagner e co-autores (1991). A obtenção de soluções piores em relação ao método de troca de ramos não foi observado por outros autores que trabalharam com implementações de ambos os métodos (Peponis, Papadopoulos e Hatziargyriou (1995), (1996); Augugliaro, Dusonchet e Mangione (1995)).

Antecipando um ponto a ser discutido adiante, não parece recomendável fazer comparações entre as abordagens de abertura sequencial de chaves e troca de ramos que desqualificam uma das alternativas. Cada uma delas tem aspectos positivos que podem ser explorados conjuntamente, como sugerido por Augugliaro, Dusonchet e Mangione (1995) e Roytelman e co-autores (1996).

1.4.2 Procedimento de Troca de Ramos

O método de troca de ramos, proposto por Civanlar e co-autores (1988), é provavelmente a alternativa mais utilizada para reduzir perdas em sistemas de distribuição. O procedimento tem início com uma configuração de operação radial. Para cada chave aberta, onde haja uma diferença de tensões entre seus terminais, é identificado o anel que se formará na rede se essa chave for fechada. Percorrendo esse anel, a partir do terminal de maior diferença de potencial, procura-se uma chave que, quando aberta, proporcione a maior redução de perdas (em relação a configuração atual). Se existir tal chave, é realizado o fechamento da primeira e a abertura da segunda (a “troca de ramos”). As perdas resistivas são reduzidas sem se perder a estrutura radial do sistema. As configurações são modificadas por trocas de ramos até que não seja mais possível melhorar a solução (ou que os ganhos sejam insignificantes).

Considere os pontos estabelecidos por Civanlar e co-autores (1988) para a identificação de troca de ramos:

1. há possibilidade de redução de perdas se houver uma diferença de tensão significativa entre os terminais de uma chave aberta;
2. a redução de perdas é alcançada com a transferência de cargas do terminal de tensão mais baixa para o terminal de tensão mais alta.

O ponto 1 indica que se existir uma diferença de potencial significativa entre os terminais de uma chave aberta e imaginarmos que a mesma poderia ser fechada, criando um anel, a lei

das tensões de Kirchhoff não estaria satisfeita no anel (isto é, a soma algébrica das diferenças de potencial das chaves pertencentes ao anel seria diferente de zero). Conseqüentemente, de acordo com o resultado de Merlin-Back, a distribuição de fluxos neste anel não será ótima. Para satisfazer a lei das tensões, alcançando as condições de otimalidade, precisa-se fazer circular fluxo (no anel, e conseqüentemente através da chave) até a equalização das tensões; este movimento de fluxo estará atendendo ao segundo ponto definido por Civanlar e co-autores.

Goswami e Basu (1992) propuseram uma versão do método de Civanlar e co-autores, onde a escolha da troca de arcos é baseada no restabelecimento das condições de otimalidade para um único anel, como descrito acima. No entanto, esses autores não perceberam que estavam propondo apenas uma pequena modificação em algoritmo já existente e o estudo do caso apresentado é muito simples para permitir conclusões sobre eventuais vantagens da modificação apresentada.

Baran e Wu (1989a) aperfeiçoaram a abordagem de Civanlar e co-autores, propondo dois métodos específicos para o cálculo de fluxos de carga em redes de distribuição radiais, onde consideram também os fluxos de potência reativa. A consideração dos fluxos de potência reativa, embora não seja um aspecto fundamental para as redes atuais, normalmente bem compensadas, abre a possibilidade de tratar com maior segurança problemas pontuais de baixo fator de potência.

Castro e Watanabe (1990) e Jasmon, Callistus e Lee (1991) propuseram, respectivamente, pequenas modificações nas abordagens de Civanlar e co-autores (1988) e Baran e Wu (1989a). Ambos os trabalhos relatam resultados positivos com aplicações em exemplos simples.

Taleski e Rajicic (1997) propuseram uma abordagem de troca de ramos para o problema de encontrar a melhor configuração para operação ao longo de um determinado período. Os autores trabalham com demandas de energia (em lugar de potências instantâneas), e procuraram encontrar uma configuração que represente o melhor compromisso para reduzir as perdas sob situações variadas de demandas de potências ao longo do período.

Sárfi, Salama e Chikhani (1996), também utilizam o método de troca de ramos, associado à uma tentativa heurística de desacoplar o problema em várias sub-redes. O desacoplamento pretende contornar o problema de crescimento do tempo de solução com a dimensão do problema. No entanto, a metodologia é avaliada em exemplo excessivamente simples para permitir levantar indicadores de eventuais benefícios e limites de sua utilização.

Zhou, Shirmohammadi e Liu (1997) adotaram abordagem semelhante a de Civanlar e co-autores, para estudar o planejamento da operação de sistemas de distribuição, com várias reconfigurações ao longo de determinado período de tempo. Esse trabalho, desenvolvido para implementação na *Pacific Gas and Electric Company (PG&E)* tem o aspecto curioso de envolver a autoria de Shirmohammadi (1989), que abandona seu procedimento de “abertura sequencial de chaves”. Aparentemente, a desistência de usar a alternativa de abertura sequencial de chaves foi motivada pela necessidade de considerar as restrições de número máximo de operações de chaves ao longo de um determinado período; no entanto, uma abordagem mais elaborada do conceito de abertura sequencial de chaves permitiria considerar essas restrições.

1.4.3 Abordagem por Construção

McDermott, Drezga e Broadwater (1999) propuseram uma heurística construtiva, tipo “gulosa” (i.e., que procura o máximo de benefícios a cada passo), que pode ser vista conceitualmente como simétrica à abordagem de Merlin-Back e Shirmohammadi-Hong. Todas as chaves são inicialmente abertas; a cada passo do algoritmo uma nova chave é fechada, conectando uma parcela adicional da carga e mantendo a rede radial. A chave escolhida para acionamento em cada passo é indicada pela estimativa do menor acréscimo de perdas, normalizado em relação ao total de carga acrescentada à rede.

McDermott e co-autores testaram sua abordagem em alguns exemplos simples de literatura, relatando resultados semelhantes aos obtidos por outras alternativas aplicadas a estes

exemplos. No entanto, seus argumentos sobre os méritos da abordagem são muito vagos; não há evidências que a indiquem como alternativa para métodos já bem sucedidos, como “abertura sequencial de chaves” e “trocas de ramos”.

1.4.4 Otimização Tradicional (programação matemática)

Merlin e Back (1975) foram os primeiros autores a propor a utilização de técnicas formais de otimização para abordar o problema de minimização de perdas através de reconfigurações. Foram também os primeiros a identificarem (no mesmo artigo) as limitações dessa alternativa.

No entanto, muitos outros autores ainda tentaram (ou tentam) seguir a trilha dos métodos formais de otimização para tratar o problema de minimização de perdas em sistemas de distribuição. Abordam problemas pequenos, fazem simplificações de representação e, muitas vezes, recorrem a heurísticas em algum ponto do processo. Esses trabalhos têm interesse como documentação do histórico de pesquisas na área e sugestão de reflexões sobre as características do problema. Não são alternativas para minimização de perdas em sistemas reais de grande porte.

Para citar alguns exemplos, Glamocanin (1990) e Wagner e co-autores (1991) linearizaram a função de perdas para estudar as possibilidades de utilizar programação linear. Liu, Lee e Vu (1989) procuraram reduzir as perdas na rede pela utilização de técnicas de otimização não linear, abordando sucessivamente o problema para dois alimentadores de cada vez - naturalmente, essa decomposição informal do problema não garante a obtenção da solução ótima global. Chen e Cho (1993) também abordam o problema para dois alimentadores e o resolvem por um método de *branch-and-bound*; em seguida, utilizam heurísticas para encontrar uma solução para o problema completo ao longo de determinado período de tempo.

1.4.5 Otimização Combinatória

As técnicas de otimização combinatória, também conhecidas como “métodos heurísticos”, podem ser interpretadas como procedimentos de “receitas genéricas” para procurar a solução de problemas. Essas receitas são baseadas (ou inspiradas) em argumentações matemáticas, princípios físicos e processos biológicos (no caso de computação evolutiva, normalmente estudada à parte, em decorrência de suas especificidades e proximidade com a área de inteligência artificial). O campo natural para a aplicação de técnicas de otimização combinatória é a abordagem de problemas difíceis, para os quais inexistem, ou são computacionalmente inviáveis, métodos de otimização exatos. *Simulating annealing*, busca tabu e GRASP (*greedy randomized adaptative search procedures*), ao lado de computação evolutiva, são as técnicas de otimização combinatória mais utilizadas.

Chiang e Jean-Jumeau (1990a) investigaram a utilização de *simulated annealing* no problema de se encontrar configurações ótimas para sistemas de distribuição radiais; o algoritmo foi aplicado em um problema simples. Embora os autores tenham considerado os resultados promissores, em trabalho posterior o *simulated annealing* foi abandonado em favor da troca de ramos (Wang, Chiang e Darling (1996)).

Cherkaoui, Bart e Germond (1993) divulgaram experiências preliminares com a utilização de busca tabu. Esta técnica foi também utilizada por Costa (1999), associada à algoritmos genéticos.

Bueno (2000) propôs uma heurística construtiva, que combina as técnicas para otimização de fluxos em redes com funções não lineares, com o método GRASP de Feo e Resende (1995). O método GRASP combina um método construtivo com busca local. Na fase de construção, cria uma solução viável, combinando uma função gulosa com seleção aleatória (informações sobre os valores dos fluxos nos arcos são utilizadas para abrir as chaves). Na fase de busca local, o método tenta melhorar a solução encontrada (através do método de troca de ramos). Os testes realizados mostram que o método é promissor para redes reais.

Tanto a busca tabu como o método GRASP são abordagens promissoras. No entanto,

ambos precisam de pesquisas adicionais que forneçam melhores subsídios sobre as possibilidades e limitações das abordagens.

1.4.6 Computação Evolutiva

Denomina-se por “computação evolutiva” os procedimentos para solução de problemas utilizando-se a “imitação” da evolução natural de organismos vivos, onde soluções evoluem (ou seja, reproduzem-se) através de gerações sucessivas, submetidas a “variações genéticas”, “seleção” e “adaptação”. Os algoritmos evolutivos são normalmente divididos em subgrupos, identificados pela forma de representação das soluções e procedimentos adotados para mutação, cruzamento, seleção e reprodução. O subgrupo “algoritmos genéticos”, mais adotado, é caracterizado pela representação de soluções através de vetores de elementos binários, denominados “cromossomos”.

Nara, Shiose, Kitagawa e Ishihara (1992) foram os pioneiros na investigação sobre o uso de computação evolutiva para minimização das perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica, com uma implementação de algoritmos genéticos. O trabalho de Nara e co-autores ilustrou as possibilidades da abordagem, mas os resultados são muito preliminares.

Costa (1999) também desenvolveu uma abordagem por algoritmos genéticos para minimização de perdas, ampliando substancialmente as idéias por Nara e co-autores. Contudo, para escapar das soluções de ótimos locais com perda de diversidade, característica importante dos algoritmos genéticos, Costa implementou estratégias de diversificação inspiradas em “busca tabu” e “cruzamentos baseados em comportamento”. Costa (1999) apresenta bons resultados para redes de pequeno e médio porte.

A estratégia desenvolvida por Nara e co-autores levava a construção de soluções inefectíveis, por violar a restrição de radialidade. Essas soluções eram descartadas, mas o processo de identificação e eliminação comprometia o desempenho da abordagem. O trabalho de Costa resolveu este problema, acrescentou inovações metodológicas de computação evolutiva

e explorou a possibilidade de se usar esses conceitos junto com busca tabu. Seus resultados foram muito promissores, mas os tempos computacionais para obtenção das melhores soluções em redes de grande porte ainda são longos; é prudente aguardar o amadurecimento desses conceitos para adotá-los em centros de controle de sistemas de distribuição.

Sistemas classificadores (Holland, 1975) são baseados na criação e atualização de regras (classificadores) em um sistema de tomada de decisões, indicando alternativas de ações, interagindo sucessivamente até não se detectar novas mudanças no ambiente. O conjunto de regras pode ser interpretado como uma população, assim procedimentos de computação evolutiva (seleção, reprodução e mutação) são utilizados para atualização das regras.

Vargas (2000) utilizou sistemas classificadores como abordagem para o problema de redução de perdas em redes de distribuição de energia elétrica. Utilizando-se da capacidade dos sistemas classificadores de se adaptarem facilmente a variações no ambiente, o trabalho abordou problemas envolvendo variações de demandas. Testes em redes de pequeno porte mostraram a aplicabilidade da metodologia.

1.4.7 Redes Neurais

As técnicas de redes neurais artificiais (ou simplesmente “redes neurais”), procuram resolver problemas por procedimentos inspirados no funcionamento do cérebro humano. Uma rede de processadores muito simples, denominados “neurônios” (normalmente simulada em computadores digitais), é “treinada” para encontrar soluções.

O uso de técnicas de redes neurais para otimização das perdas em sistemas de distribuição foi investigado por Kim, Ko e Jung (1993) e, por Gauche, Coelho e Teive (1999). Ambos os trabalhos obtiveram resultados satisfatórios em exemplos simples.

Uma característica das técnicas de redes neurais é que elas precisam ser “treinadas” a partir de soluções ótimas conhecidas. Assim, a aplicação desta metodologia nos parece mais indicada para monitoramento das redes, identificando a necessidade de reconfiguração

quando há variações de carga. Se adequadamente concebidas e “treinadas”, redes neurais podem sugerir novas configurações em tempos computacionais muito pequenos. Naturalmente, precisam estar apoiadas em um bom método para encontrar configurações de poucas perdas.

1.4.8 Sistemas Especialistas

Os sistemas especialistas são procedimentos para solução de problemas que procuram simular o raciocínio humano de um “especialista”. Sua aplicação natural é em problemas “pouco estruturados”, de difícil representação matemática, mas que os especialistas conseguem lidar, usando a “intuição” resultante de experiência na área. O cerne da abordagem por sistemas especialistas é procurar “codificar” a intuição de especialistas através de um conjunto de regras heurísticas.

Taylor e Lubkeman (1990) aplicaram as idéias de sistemas especialistas para melhorar configurações em sistemas de distribuição, procurando eliminar sobrecargas de transformadores e reduzir perdas, pela utilização de regras heurísticas que incluem (de forma muito simplificada) os pontos estabelecidos por Cinvanlar e co-autores (1988), para identificação de trocas de ramos atraentes. Taylor e Lubkeman ilustraram sua abordagem em exemplo simples; nas conclusões do seu trabalho, argumentam que a metodologia é capaz de reduzir perdas.

Jung, Kim e Ko (1993) também adotaram abordagem por sistema especialista para tratar o problema de sobrecarga de transformadores, limites de queda de tensão e violação de restrições térmicas de linhas - esses são os mesmos autores que estudaram a aplicação de redes neurais para o problema de minimização de perdas (Kim et al., 1993). Embora o problema estudado tenha proximidade com o objetivo de redução de perdas, Jung, Kim e Ko não argumentam que sua abordagem seja adequada para redução de perdas.

É improvável que sistemas especialistas baseados em regras elementares forneçam abordagens adequadas para minimização de perdas em sistemas reais. O problema de minimização de perdas em sistemas de distribuição pode ser bem representado através de modelos matemáticos. Por outro lado, sua complexidade inviabiliza a obtenção de boas soluções com base apenas na “intuição” de profissionais qualificados, com experiência de “convivência” com a rede.

A obtenção de soluções de mínimas perdas para o problema com dimensões reais tem exigido a união de manipulações matemáticas elaboradas com heurísticas sofisticadas, implantadas em programas de computadores que realizam processamentos intensos de informações. Trata-se de uma situação onde inexistente intuição de especialistas suficientemente qualificada para codificação em regras que permitam oferecer configurações de poucas perdas, para sistemas reais de porte não trivial.

Os sistemas especialistas podem, no entanto, ser uma metodologia atraente para organizar a aplicação de procedimentos de minimização de perdas através de reconfigurações de redes. A execução dos chaveamentos necessários para se modificar configurações de redes deve passar pelo crivo de engenheiros com experiência na operação, que levam em consideração aspectos adicionais importantes, como características físicas dos equipamentos e história de incidentes na rede. Sistemas especialistas conseguem lidar com essas considerações adicionais, de difícil representação matemática.

1.4.9 Estratégias Fuzzy

A *teoria fuzzy* foi apresentada em 1964 por Lofti A. Zadeh (Zadeh, 1965), definindo a teoria como uma lógica utilizada para atividades que envolvem situações ambíguas (como conjuntos que não possuem fronteiras) nas quais a lógica binária apresenta fragilidade para tratá-las. Em *lógica fuzzy*, ao invés de se utilizar nomes ou números para representar variáveis físicas, utiliza-se variáveis e termos linguísticos (por exemplo, “temperatura e “velocidade”; “alto”

e “baixo”, respectivamente), regras de inferência (“se”, “então”) e conclusões aproximadas (“muito”, “mais ou menos”).

O termo *fuzzy* significa nebuloso, difuso, e se refere ao fato de, em muitos casos, não se conhecer completamente os sistemas que estão sendo analisados. A *lógica fuzzy* objetiva modelar representações e raciocínios imprecisos como elementos de um conjunto que serão classificados através de uma “função de pertinência” (Zadeh, 1965).

Sarfi e Solo (2002a) desenvolveram uma metodologia baseada em três conjuntos de heurísticas para resolver o problema de redução de perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica. Estas heurísticas geraram bases de regras que são aplicadas segundo uma hierarquia de resolução para o problema. Em linhas gerais, esta hierarquia visa, através de um estudo detalhado das redes, preservar a topologia radial, não exceder limites de linhas e equipamentos e reduzir as perdas.

Num segundo trabalho, Sarfi e Solo (Sarfi and Solo, 2002b) apresentam os detalhes da divisão das bases de regras, desenvolvidas por Sarfi e Solo (2002a), em duas partes: as que podem ser tratadas por *lógica fuzzy* e aquelas que não podem ser. Como exemplo, heurísticas criadas para controlar níveis de tensão são regras que podem ser tratadas por *lógica fuzzy*, enquanto heurísticas para tratar radialidade em redes não.

Os autores concluem o trabalho citando que a metodologia não violou as restrições, resolvendo o problema com uma rede de pequeno porte. No entanto, não se pode avaliar a eficácia da metodologia pois o trabalho não contém a apresentação de simulações envolvendo a aplicação da abordagem desenvolvida.

Huang e Chin (Huang and Chin, 2002) desenvolveram uma heurística baseada em operações *fuzzy* para o problema de reconfigurações em redes. A estratégia considera um conjunto *fuzzy* que trata, simultaneamente, o problema de redução de perdas e de balanceamento das cargas através da abertura e fechamento de pares de chaves, para não violação da restrição de radialidade. Para diminuir o espaço de busca a ser explorado, a heurística explora a reconfiguração de redes manobrando pares de chaves pertencentes a uma vizinhança de

cada alimentador.

Huang e Chin (2002) apresentaram testes com redes de pequeno porte, incluindo um exemplo com variação de demanda. A partir de uma curva de carga, o trabalho realiza uma comparação entre as perdas originais e as reduções de perdas alcançadas, executando o algoritmo em cada hora da curva de carga. No entanto, não é apresentado o número de chaveamentos necessários para a obtenção das reduções de perdas em cada ponto da curva. A partir de uma tabela contendo períodos diversos são apresentados os números de chaveamentos necessários para cada período, onde pode ser verificado que estes são pequenos. Porém, os autores não especificaram o carregamento e a variação de carga em cada período, e nem as reduções de perdas obtidas pela abordagem nesses exemplos. Como os testes no trabalho não estão relacionados (resultados da tabela não correspondem aos resultados que definem a curva de carga) avaliações precisas sobre a eficiência da metodologia ficam prejudicadas.

1.4.10 Buscas Informadas

Cavellucci e Lyra (1997) apoiaram-se na união de técnicas de otimização não linear em grafos e métodos de buscas informadas (amadurecidos em pesquisas na área de inteligência artificial) para atacar novamente a dificuldade de encontrar um ótimo global para o problema de minimização de perdas em rede radiais de distribuição.

A abordagem de Cavellucci e Lyra pode ser interpretada como uma união das abordagens por abertura sequencial de chaves e troca de ramos. De forma análoga a Merlin-Back (1975) e Shirmohammadi-Hong (1989), a restrição de radialidade é relaxada numa primeira etapa, onde se obtém a distribuição ótima de fluxos para uma rede de anéis; esta solução indica a chave a ser aberta, normalmente aquela de menor fluxo (na abordagem de Cavellucci e Lyra, outros indicadores podem também ser usados para escolha da chave a ser aberta). Em seguida, abre-se a chave escolhida e encontra-se novamente a distribuição ótima de fluxos

na rede (agora, com um anel a menos); o processo é repetido até que uma rede radial seja encontrada.

Na obtenção de redes radiais, as idéias de Cavellucci e Lyra são semelhantes, em grandes linhas, às de Merlin-Back e Shirmohammadi-Hong (mas utilizando técnicas de otimização não linear de fluxos em redes para encontrar distribuições ótimas de energia). No entanto, Cavellucci e Lyra, não interrompem o processo de busca quando encontram a primeira solução radial. Apoiando-se em métodos de buscas informadas da área de inteligência artificial, continuam a explorar a rede até que a solução ótima seja encontrada. Na busca da solução ótima, todas as possíveis trocas de ramos entre soluções radiais são avaliadas, de forma explícita ou implícita; no entanto, não há risco do processo caminhar para ótimos locais, como no método de Civanlar e co-autores (1988).

Três métodos de buscas informadas foram desenvolvidos por Cavellucci e Lyra (1997): *backtracking informado*, *backtracking heurístico* e A*. Como o próprio nome “busca informada” sugere, todos os métodos usam informações para abreviar a procura da solução de mínimas perdas - as informações são obtidas das características do problema e de configurações radiais encontradas no processo de busca. O *backtracking informado* é muito semelhante ao método *branch-and-bound* desenvolvido por Merlin-Back (1975), mas apoia-se no formalismo de buscas *backtracking*, da área de inteligência artificial. O *backtracking heurístico* acrescenta ao *backtracking informado* artifícios para antecipar caminhos promissores e não promissores. O A* tem dispositivos mais sofisticados para discernir sobre caminhos a explorar, mas requer processamento mais trabalhoso. Entre os três métodos, o *backtracking heurístico* forneceu melhores resultados (Cavellucci and Lyra, 1997).

Merlin-Back (1975), Shirmohammadi-Hong (1989), e demais autores que adotaram o método de abertura sequencial de chaves, usaram algoritmos de fluxos de carga para encontrar a distribuição ótima de fluxos nas redes em anéis - apoiando-se no resultado demonstrado por Merlin-Back, pelo qual a distribuição ótima de fluxos corresponde ao atendimento

das duas leis de Kirchhoff (algoritmos de fluxos de carga fornecem soluções com essas características). Cavellucci e Lyra (1997) seguiram caminho alternativo, usando método de otimização não linear de fluxos em redes para encontrar distribuições ótimas de fluxos; partindo de uma solução que satisfaz a primeira lei de Kirchhoff (das correntes) o algoritmo evolui para a solução (ótima) que satisfaz também a segunda lei (das tensões). A estratégia de Cavellucci e Lyra explora a estrutura de redes do problema, capacitando-se a contornar as dificuldades encontradas para resolver repetidamente problemas de fluxos de carga em redes grandes.

Embora Cavellucci e Lyra (1997) tenham aberto o caminho para aumentar a dimensão dos problemas para os quais é possível encontrar a configuração de perdas mínimas (ou seja, um ótimo global para o problema), o esforço computacional necessário é ainda grande. Estudos sobre alternativas de utilização de processamento paralelo foram divulgados no trabalho de Tão, Cavellucci e Lyra (1999). Esses estudos permitiram reduzir o tempo de processamento e aumentar o tamanho das redes tratadas; no entanto, ainda não é possível garantir que seja possível a obtenção de configurações ótimas para redes grandes.

1.4.11 Reconfiguração de Redes e Instalação de Capacitores

Trabalhos sobre Instalação de Capacitores

Os benefícios com a instalação de capacitores em sistemas de distribuição dependem das características dos equipamentos e da forma de instalação nos sistemas de distribuição. Especificamente, dependem do número de capacitores instalados, do tipo (fixos ou chaveáveis), da dimensão e do tipo de controle utilizado. Portanto, o problema de instalação de capacitores corresponde a definir o número de capacitores a serem instalados, suas localizações, dimensões, características e estratégias de controle.

Usando hipóteses muito simplificadoras, Neagle e Samson (1956) desenvolveram metodologia analítica, baseada em curvas de perdas, para colocação de um banco de capacitores

fixo nos alimentadores de sistemas de distribuição (um único banco para cada alimentador).

Cook (1959) estende a formulação de Neagle e Samson (1956), levando em consideração as variações periódicas das cargas no cálculo das reduções de perdas de energia. Embora considere a possibilidade de colocar mais de um banco de capacitores por alimentador, Cook conclui que aproximadamente 90% da redução possível de perdas de energia pode ser obtida com a instalação de um único banco fixo de capacitores. Ressalta, no entanto, que em situações onde a colocação de capacitores procura obter outros benefícios (além da redução de perdas), a utilização de múltiplos bancos deve ser considerada.

Durán (1968) utiliza método de programação matemática como alternativa para o problema de instalação de capacitores. Durán formula o problema como um procedimento de otimização em estágios, onde cada estágio corresponde a uma localização do alimentador onde se considera a possibilidade de instalação de capacitores. A partir dessa formulação, o problema foi equacionado para soluções por programação dinâmica, considerando o aspecto discreto das dimensões de capacitores e funções de custo realistas. Ainda hoje, a abordagem proposta por Durán é vista como uma metodologia atraente para abordar o problema de instalação de capacitores em cenários de demandas constantes (Peponis et al., 1995).

Vários trabalhos na área indicam pesquisas envolvendo reduções de perdas em redes de distribuição de energia elétrica através de instalação de capacitores, usando diversas abordagens (Lyra et al., 2002). Baran e Wu (1989b; 1989c), Baldick e Wu (1990), Augugliaro e co-autores (1990), Chung e Shaoyun (1997) e Medeiros e Pimentel (2000) são autores que utilizaram técnicas de programação matemática para desenvolver abordagens para resolução do problema de instalação de capacitores.

Entre os trabalhos que utilizam técnicas de otimização combinatória podemos citar Kirkpatrick e Vecchi (1983) (abordagem por *simulated annealing*), Feo e Rezende (1994) (abordagem por GRASP) e Glover e Laguna (1997) (abordagem por busca tabu).

Técnicas utilizando algoritmos evolutivos indicam Boone e Chiang (1993) como primeiro trabalho a adotar algoritmos genéticos para a resolução do problema de localização de

capacitores em redes de distribuição. Seguem-se a este os trabalhos de Iba (1994), Miu e co-autores (1997), Ghose e co-autores (1999), Levitin e co-autores (2000).

Salama e Chikhani (1992; 1995) utilizam sistemas especialistas que “imitam” a sequência de raciocínio dos planejadores de redes para instalação de capacitores. Ananthapadmanabha e co-autores (1996) também desenvolveram abordagem utilizando sistemas especialistas para organizar o procedimento de *simulated annealing* na otimização dos capacitores. Carlisle e El-Keib (2000) tratam o problema de instalação de capacitores utilizando uma abordagem simples de procedimento de busca informada.

Gallego e co-autores (2001) desenvolveram uma abordagem que utiliza busca tabu com algoritmos genéticos e *simulated annealing* para otimização de capacitores na rede. Mendes e co-autores (2002) e Gonzalez e Lyra (2003) apresentam bons resultados em trabalhos recentes. Mendes e co-autores (2002) utilizam abordagem por algoritmos meméticos para instalação de capacitores nas redes, obtendo melhora nos resultados apresentados por Gallego e co-autores (2001). Gonzalez e Lyra (2003) apresentaram novos aspectos estruturais do problema indicando que abordagens por programação dinâmica aplicadas em redes de dimensões grandes são bem sucedidas.

Trabalhos sobre Reconfigurações e Instalação de Capacitores

Lee e Brooks (1988) aplicam reconfiguração de redes e instalação de capacitores separadamente, em um método baseado em abordagem anterior utilizada por Brooks, Kennedy e Sanders (1986). Os testes utilizaram curvas de cargas médias, com dados obtidos nos anos de 1984 e 1985 fornecidos pela *Pensylvania Power and Light Company (PP&L)*, divididas em períodos (estações climáticas): cada um destes períodos está dividido em períodos mensais, semanais e diários. Foram testadas variações de uma rede com 26 alimentadores e 8 subestações. Os resultados mostraram que o método aplicado apresentou bons resultados na redução de perdas resistivas. Um aspecto curioso é que as maiores economias foram alcançadas nos períodos noturnos.

Peponis e co-autores (1995) utiliza banco de capacitores juntamente com reconfiguração de redes. A abordagem realiza reconfigurações na rede, utilizando métodos baseados nas idéias de abertura sequencial de chaves de Merlin e Back (1975) ou de troca de ramos de (Civanlar et al., 1988), levando em consideração os bancos de capacitores já instalados. Após este passo, todos os bancos de capacitores instalados são removidos e aplicando-se a técnica de programação dinâmica de Durán (1968), novos bancos são instalados de forma a minimizar o custo das perdas. Estes dois passos são repetidos até que o conjunto de capacitores não se altere.

Os testes realizados por Peponis e co-autores (1995) envolveram a aplicação de cada um dos métodos de reconfiguração de redes em uma rede de pequeno porte. Os autores consideraram também quatro tipos de modelos diferentes para representar as cargas: (i) corrente constante; (ii) fluxo constante; (iii) impedância constante e (iv) uma combinação dos modelos (i), (ii) e (iii). Os resultados indicaram que os dois métodos testados como alternativa para reconfiguração de redes, considerando-se o modelo de corrente constante, obtiveram praticamente as mesmas reduções de perdas. A diferença entre eles está no tempo computacional de execução: o método baseado nas idéias de abertura sequencial de chaves de Merlin e Back (1975) utilizou um tempo 3 vezes maior para a obtenção de uma porcentagem de redução de perdas de 0,15 de ponto percentual acima. Os testes seguem com a aplicação de bancos capacitores fixos na melhor configuração obtida, variando os modelos para representação das cargas.

Jiang e Baldick (1996) propuseram um método para resolver problemas de minimização de perdas resistivas com reconfiguração de redes juntamente com instalação de capacitores. O método utiliza um algoritmo de *simulated annealing* para reconfiguração de redes com idéias baseadas nos algoritmos de Chiang e Jummeau (1990b; 1990a) e um algoritmo de otimização discreta para instalação de capacitores, baseado nas idéias de Baldick e Wu (1990), utilizando método de Newton.

A abordagem desenvolvida está dividida em três metodologias: (i) a cada rede radial,

encontrada pelo algoritmo de *simulated annealing*, realiza-se uma busca otimizada para a instalação de capacitores variáveis, obtendo a configuração de mínimas perdas (*Full Search*); (ii) encontrar a rede radial de menores perdas pelo algoritmo de *simulated annealing* e então realizar uma busca otimizada para instalação de capacitores variáveis (*Quick Search*) e (iii) a cada rede radial, obtida pelo algoritmo de *simulated annealing*, realiza-se uma busca otimizada para instalação de capacitores fixos (*Feasible Search*). Os resultados obtidos mostraram que as 3 metodologias, aplicadas a uma rede teste de pequeno porte, alcançaram reduções de perdas muito próximas entre si, apenas se diferenciando em tempos computacionais de execução. Com base nesses resultados, os autores concluem que a metodologia de *Quick Search* é a melhor opção para redes de pequeno porte, inclusive sugerindo que o problema, para estes casos, pode ser tratado com desacoplamento entre a estratégia de reconfiguração de redes e instalação de capacitores.

Ghose, Goswami e Basu (1999) propõem um algoritmo genético (AG) com indivíduos compostos de 4 *substrings* codificados por binários. O primeiro *substring* representa os possíveis n locais para instalação de capacitores e os demais n *substrings* representam os tamanhos (em kVAr) dos capacitores a serem instalados. Reprodução é feita usando pais de cada *substring*. A função de *fitness* agrega um termo de penalização para que não haja violação das restrições de limite de tensão em cada nó da rede. Os testes computacionais, realizados através da aplicação da metodologia em duas redes radiais, mostram que o algoritmo apresenta melhores resultados quando o AG incorpora a decisão sobre os locais de instalação dos capacitores.

Su e Lee (2001), assim como Jiang e Baldick (1996), avaliaram o acoplamento entre os problemas de reconfiguração de redes (utilizando o método *simulated annealing*) e localização de capacitores para redução de perdas em sistemas de distribuição. A abordagem de Su e Lee (2001) utiliza a formulação de cálculo dos fluxos de potência de Baran e Wu (1989a) para a instalação de capacitores.

Os testes executados por Su e Lee (2001) utilizaram uma rede de pequeno porte e quatro tipos de simulações para a obtenção de redução de perdas: aplicação da técnica de reconfigurações; aplicação da técnica de localização de capacitores; aplicação da técnica da reconfiguração e posterior localização de capacitores e aplicação simultânea das técnicas de reconfiguração e localização de capacitores. Observando-se os resultados obtidos pelos testes com as quatro simulações pode-se perceber que as estratégias que envolvem as duas últimas técnicas surtiram maiores reduções de perdas. No entanto, ao verificar-se a diferença entre as porcentagens de reduções finais obtidas por essas duas últimas simulações (diferença de 0,8 kW, em um sistema cujas perdas iniciais são de 511,10 kW) não é possível concluir que há um acoplamento entre os problemas de reconfiguração de redes e localização de capacitores.

1.5 Principais Contribuições do Trabalho

A contribuição deste trabalho é apresentar um conjunto de inovações para resolver o problema de redução de perdas através de reconfigurações em sistemas reais de distribuição de energia elétrica.

As principais contribuições estão associadas à procedimentos de buscas informadas em grafos, da área de inteligência artificial, a serem apresentadas no Capítulo 3; métodos de otimização não-linear para redes, a serem apresentados no Capítulo 4 e heurísticas baseadas em características próprias do problema, a serem apresentadas no Capítulo 6. As inovações incluem um conjunto de desenvolvimentos específicos para tratar sistemas de distribuição de grande porte, que serão apresentados nos Capítulos 4 e 5.

O trabalho apresenta também uma nova abordagem para redução de perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica através de estratégia conjunta de reconfigurações e instalação de capacitores em pontos adequados da rede. De forma análoga ao problema de redução de perdas por reconfigurações, estas técnicas foram desenvolvidas para abordar o problema em sistemas reais de grande porte e serão apresentadas no Apêndice A.

Capítulo 2

Modelagem do Problema de Minimização de Perdas em Redes de Distribuição de Energia Elétrica

Neste capítulo será apresentado o modelo do problema de minimização de perdas em redes de distribuição primária de energia elétrica. Na Seção 2.1 serão introduzidos os componentes utilizados para representar as principais entidades presentes nas redes de distribuição primária de energia elétrica. A Seção 2.2 apresenta o modelo de grafos adotado para representar os componentes e suas relações nas redes de distribuição. Nas Seções 2.3 e 2.4 estão descritos uma formulação e a estratégia geral de solução do problema de minimização de perdas em redes de distribuição de energia elétrica adotados neste trabalho.

2.1 Principais Componentes das Redes de Distribuição Simplificada

Para a descrição do problema de minimização de perdas, a representação das redes de distribuição de energia elétrica foi baseada nos seguintes componentes:

- subestações (SE);
- chaves (CH);
- linhas elétricas (L);
- blocos de carga (BC);
- capacitores (CAP).

A Figura 2.1 apresenta o exemplo de uma rede de distribuição primária simplificada, com 2 subestações, 9 blocos de carga, 23 linhas elétricas, 10 chaves e 1 capacitor.

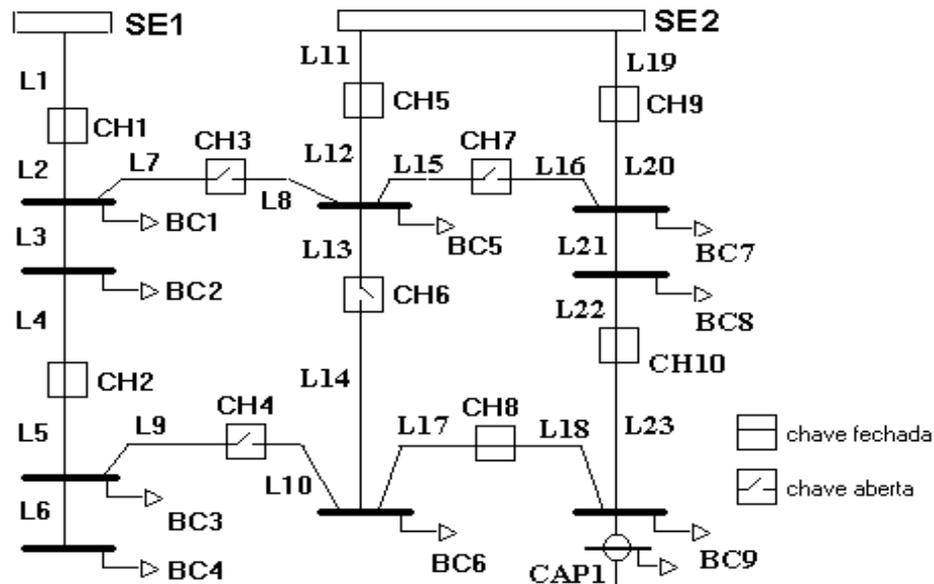


Figura 2.1: Exemplo de rede de distribuição primária simplificada

A próxima seção apresenta o modelo de grafos adotado neste trabalho que representa as redes de distribuição e suas relações (Ahuja et al., 1993; Cavellucci and Lyra, 1997).

2.2 Representação das Redes de Distribuição por Grafos

A representação de redes de distribuição por grafos é mais conveniente por apresentar a relação intuitiva de grafo-rede e por tornar possível o desenvolvimento de algoritmos mais eficientes. Esta seção apresenta as principais definições sobre grafos utilizadas ao longo de todo trabalho (Ahuja et al., 1993).

2.2.1 Noções de Grafos

Definição 2.2.1 *Um grafo $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \mathcal{A})$ é constituído por um conjunto \mathcal{N} finito e não vazio de pontos, denominados nós, e um conjunto \mathcal{A} de pares de elementos denominados arcos.*

Existem dois tipos de grafos: os *grafos orientados* e os *grafos não-orientados*. Os grafos orientados $\mathcal{G}_d = (\mathcal{N}, \mathcal{A}_d)$, são constituídos por um conjunto \mathcal{N} de nós e por um conjunto \mathcal{A}_d de arcos, cujos elementos são pares ordenados de nós distintos. Os grafos não orientados $\mathcal{G}_n = (\mathcal{N}, \mathcal{A}_n)$ são definidos da mesma forma que $\mathcal{G}_d = (\mathcal{N}, \mathcal{A}_d)$, exceto que os arcos do conjunto \mathcal{A}_n são pares não ordenados de nós distintos. Assim, num grafo não orientado, nos referimos a um arco entre os nós i e j como (i, j) ou (j, i) .

A Figura 2.2 (a) ilustra um exemplo de grafo não orientado, constituído pelo conjunto de nós $\mathcal{N} = \{1, 2, 3, 4\}$ e pelo conjunto de arcos que pode ser representado por $\mathcal{A} = \{(1, 2), (1, 4), (1, 3), (2, 4), (4, 3)\}$. A Figura 2.2 (b) ilustra um exemplo de grafo orientado constituído pelo conjunto de nós $\mathcal{N} = \{1, 2, 3, 4\}$ e pelo conjunto de arcos $\mathcal{A} = \{(1, 2), (2, 4), (3, 1), (3, 2), (4, 3)\}$.

Definição 2.2.2 *Um caminho entre os nós i_1 e i_k em um grafo $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \mathcal{A})$ é uma sequência de nós e arcos $\{i_1, a_1, i_2, a_2, \dots, i_{k-1}, a_{k-1}, i_k\}$ tal que $a_r = (i_r, i_{r+1}) \in \mathcal{A}$ para $1 \leq r \leq k - 1$.*

Propriedade 2.2.1 *Um caminho de k nós é formado por $k - 1$ arcos.*

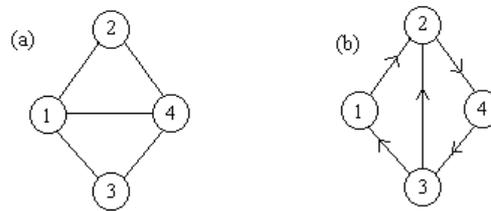


Figura 2.2: Exemplo de grafo (a) não orientado e (b) orientado

Definição 2.2.3 Um ciclo em um grafo $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \mathcal{A})$ é um caminho $i_1, i_2, \dots, i_{k-1}, i_k$ de nós onde $i_1 = i_k$, $k \geq 3$. Pode-se escrever um ciclo como $i_1, i_2, \dots, i_{k-1}, i_k, i_1$, $k \geq 3$. Um grafo que não possui ciclos é chamado de grafo acíclico.

A Figura 2.3 (a) ilustra um exemplo do caminho $((1,2),(2,4),(4,3))$ para o grafo da Figura 2.2 (a). A Figura 2.3 (b) ilustra um ciclo.

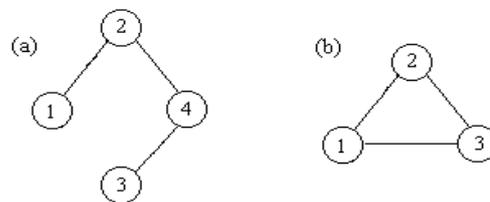


Figura 2.3: Exemplo de (a) caminho e (b) ciclo

Definição 2.2.4 Um grafo $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \mathcal{A})$ é conexo se existir um caminho entre cada par de nós de \mathcal{G} .

Definição 2.2.5 Uma árvore é um grafo acíclico e conexo.

Propriedade 2.2.2 Uma árvore com n nós contém exatamente $(n-1)$ arcos.

Definição 2.2.6 Em um grafo orientado $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \mathcal{A})$ de n nós e m arcos, a matriz de incidência nó-arco A ($m \times n$) é definida por:

$$A = [\alpha_{kr}] \text{ tal que } \begin{aligned} \alpha_{kr} &= 1 && \text{se } i_k \text{ é o nó inicial do arco } a_r; \\ \alpha_{kr} &= -1 && \text{se } i_k \text{ é o nó final do arco } a_r; \\ \alpha_{kr} &= 0 && \text{se } i_k \text{ não é o nó inicial nem o nó final do arco } a_r. \end{aligned}$$

A Figura 2.4 (a) apresenta um exemplo de árvore. A Figura 2.4 (b) apresenta a montagem da matriz de incidência nó-arco para a árvore especificada em (a).

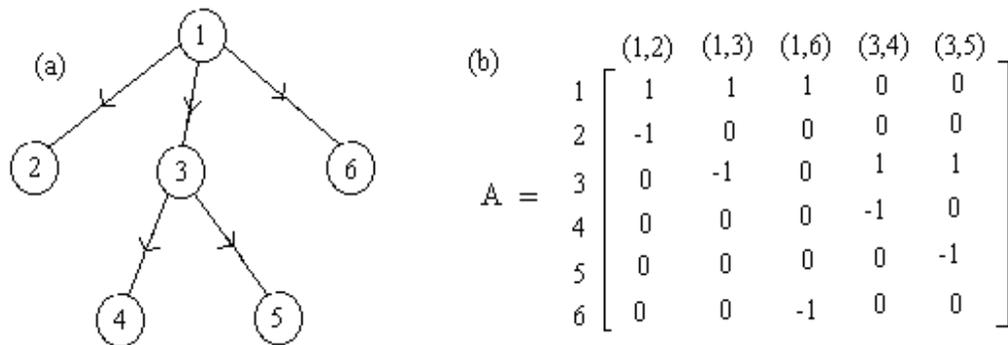


Figura 2.4: Exemplo de (a) árvore e (b) matriz de incidência nó-arco para a árvore especificada em (a)

2.2.2 Grafos que Representam Redes de Distribuição Elétrica

Para a formulação do problema de minimização de perdas, as redes primárias de distribuição elétrica podem ser representadas por modelos de grafos $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \mathcal{A})$ (Cavellucci and Lyra, 1997). Neste caso, \mathcal{N} é o conjunto de nós, que definem subestações (SE), blocos de carga (BC) e capacitores (CAP) e \mathcal{A} é o conjunto de arcos, que definem chaves (CH) e linhas

elétricas (L). Além desta representação, a formulação assume que os arcos associados à chaves incluem as linhas de acesso às mesmas. A Figura 2.5 ilustra um trecho de rede com essas características (Civanlar et al., 1988; Baran and Wu, 1989a).

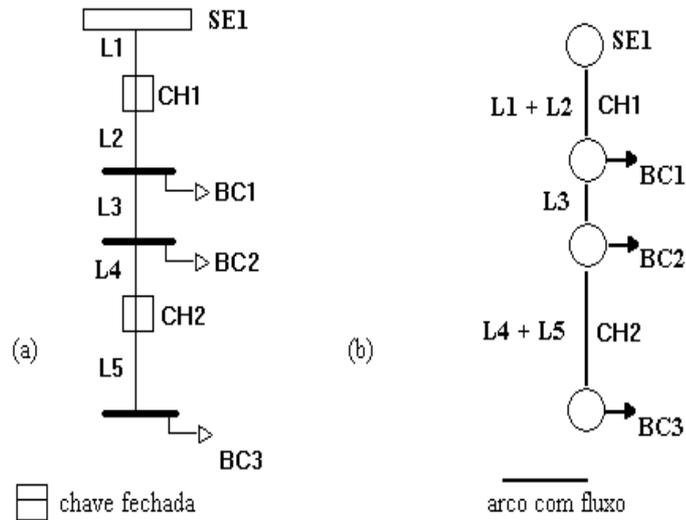


Figura 2.5: Apresentação de um trecho de rede e sua respectiva representação utilizando grafos

O grafo contido na Figura 2.5(b) representa a rede ilustrada na Figura 2.5(a). Neste caso, o grafo apresenta o primeiro arco associado à chave CH1 e que envolve as linhas L1 e L2. O segundo arco está associado à linha L3; o terceiro arco está associado à chave CH2 e envolve as linhas L4 e L5. Por possuírem a mesma resistência, as perdas associadas aos arcos 1 e 3 irão incluir a soma dos comprimentos das linhas L1, L2 e L4, L5, respectivamente.

A Figura 2.6 ilustra o grafo que representa a rede de distribuição apresentada na Figura 2.1, utilizando a representação por modelo de grafos.

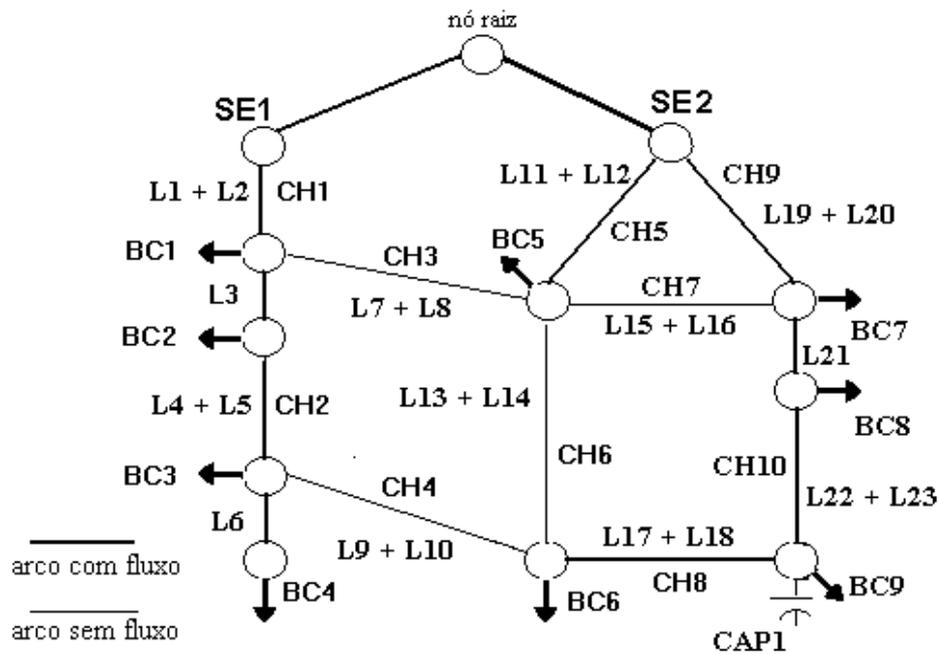


Figura 2.6: Grafo associado à rede de distribuição apresentada

A próxima seção apresenta a formulação do problema de minimização de perdas resistivas para redes de distribuição primária de energia, utilizando a abordagem simplificada.

2.3 Formulação do Problema de Redução de Perdas para Reconfiguração de Redes

Em geral, as redes de distribuição primária de energia elétrica operam com configurações radiais, isto é, a rede não possui ciclos. Por isso, os grafos que representam essas redes em operação são estruturas de árvores. Como exemplo, a Figura 2.7 ilustra uma árvore associada à rede de distribuição apresentada na Figura 2.1.

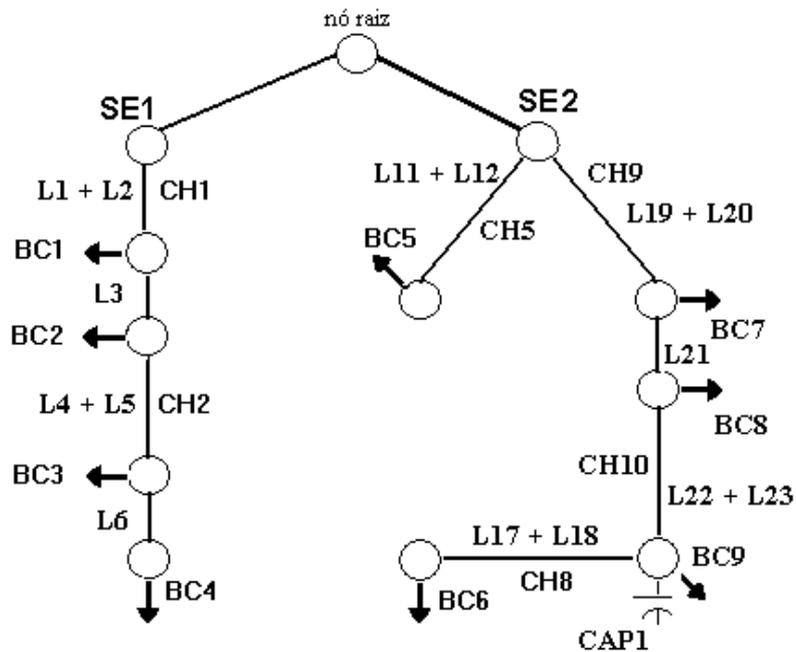


Figura 2.7: Árvore associada ao grafo da rede de distribuição

Em termos descritivos, podemos definir o problema de minimização de perdas elétricas em redes de distribuição primária como:

Minimizar Perdas elétricas
sujeito a

- atendimento ds cargas;
- limites de fluxo;
- redes em operação radial.

Para a descrição matemática do problema, suponha que se tenha uma árvore associada à uma rede de um alimentador, como apresentada na Figura 2.8.

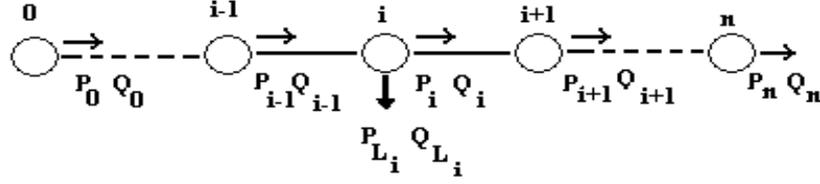


Figura 2.8: Representação simplificada do grafo de uma rede de um alimentador

Suponha também que P_i e Q_i sejam os fluxos de potências ativas e reativas, respectivamente, no arco i . Seja V_i a tensão no nó i e sejam r_i , y_i a resistência e a reatância, respectivamente, do arco i . Sejam $P_{L_{i+1}}$ e $Q_{L_{i+1}}$ as cargas ativas e reativas, respectivamente, no nó $i + 1$ que serão consideradas constantes.

Os cálculos dos fluxos de potências ativas e reativas (Equações 2.1 e 2.2, respectivamente) e das tensões (Equação 2.3) em redes radiais, são dadas por (Baran and Wu, 1989a):

$$P_{i+1} = P_i - r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - P_{L_{i+1}}, \quad (2.1)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - y_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - Q_{L_{i+1}}, \quad (2.2)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + y_i Q_i) + (r_i^2 + y_i^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2}. \quad (2.3)$$

Estas equações são denominadas *equações dos fluxos nas linhas*. Se P_0 , Q_0 e V_0 são conhecidos, P_{i+1} e Q_{i+1} podem ser obtidos para todos os arcos $i + 1$ e V_{i+1} pode ser obtido para todos os nós $i + 1$, aplicando-se as equações dos fluxos nas linhas sucessivamente (Baran and Wu, 1989a).

Supondo que A é a matriz ($m \times n$) de incidência nó-arco (para m nós e n arcos) associado ao grafo $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \mathcal{A})$, o total das perdas elétricas em uma rede de distribuição pode ser calculado por:

$$\text{Perdas} = \sum_{k \in A} r_k \frac{(P_k^2 + Q_k^2)}{V_k^2}. \quad (2.4)$$

Uma das simplificações adotada para o cálculo aproximado dos fluxos de potências e das perdas em redes de distribuição elétrica é tomar-se $V_i^2 \cong 1$ p.u. para cada nó i da rede (Baran and Wu, 1989a). A outra é perceber que os termos quadráticos que representam as perdas nos arcos são muito menores que os valores das potências ativa e reativa em cada arco i da rede.

Utilizando-se essas simplificações, as Equações 2.1, 2.2 e 2.4 podem ser reescritas como:

$$P_{i+1} = P_i - P_{L_{i+1}}, \quad (2.5)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - Q_{L_{i+1}}, \quad (2.6)$$

$$\text{Perdas} = \sum_{k \in A} r_k (P_k^2 + Q_k^2) \quad p.u. \quad (2.7)$$

As restrições de atendimentos das cargas são dadas por:

$$Ax = b,$$

onde o vetor $(nx1)$ de fluxos de potências é representado por x e b representa o vetor $(mx1)$ de demandas em cada nó.

Os fluxos de potência devem satisfazer as restrições de capacidade física de fluxos das linhas de rede. Esta restrição pode ser caracterizada por:

$$\underline{x} \leq x \leq \bar{x}.$$

Supondo que \mathcal{A}' seja o conjunto de arcos com fluxos diferentes de zero, a restrição de operação radial da rede é dada por:

$$\mathcal{G}' = [\mathcal{N}, \mathcal{A}'] \text{ uma árvore.}$$

Com estas três restrições e supondo-se também que a injeção de fluxo de potência na rede seja igual ao fluxo de potência necessário para abastecer todas as cargas nos nós, o problema de minimização de perdas para redes de distribuição elétrica pode ser caracterizado como:

$$\text{Min } \sum_{k \in A} r_k * x_k^2 \quad (2.8)$$

$$(\mathcal{P}_1) \quad \text{sa}$$

$$Ax = b \quad (2.9)$$

$$\underline{x} \leq x \leq \bar{x} \quad (2.10)$$

$$\mathcal{G}' = [\mathcal{N}, \mathcal{A}'] \text{ uma árvore} \quad (2.11)$$

É útil salientar que apenas os arcos com fluxo diferente de zero (ou seja, os arcos pertencentes ao conjunto \mathcal{A}') é que farão parte do total de perdas a ser minimizado.

Neste trabalho pretende-se primeiramente resolver o problema de redução de perdas em redes considerando os fluxos de potências ativas na formulação acima. As potências reativas serão consideradas no problema de redução de perdas numa segunda fase de resolução: a de busca local. É o que será apresentado, em linhas gerais, na próxima seção.

2.4 Estratégia Geral de Solução do Problema de Redução de Perdas por Reconfiguração de Redes

Para resolver o problema de redução de perdas em redes reais de distribuição de energia elétrica através de reconfigurações de redes, foi desenvolvido um método de duas fases que

define a primeira abordagem desenvolvida neste trabalho. A primeira etapa do método realiza uma busca ampla no espaço global de soluções utilizando procedimentos de buscas informadas em grafos (Cavellucci, 1998) — caracterizando a busca heurística modular. A segunda etapa realiza uma busca local no espaço de soluções baseada no método da troca de ramos, usando o algoritmo implementado por (Baran and Wu, 1989a).

O procedimento de busca heurística modular foi desenvolvido através da adição de conhecimento obtido do problema de redução de perdas à busca backtracking heurística desenvolvida por Cavellucci e Lyra (1997). As principais características deste procedimento envolvem a adoção de uma função de avaliação heurística e de um parâmetro que considera um subconjunto de arcos dentre todos que poderão ser abertos. A função de avaliação realiza uma poda antecipada. O parâmetro caracteriza o número de ramificações possível para cada nó já explorado na árvore de busca. Estes dois critérios juntos definem quais serão os próximos nós a serem explorados, investigando uma parcela mais promissora do espaço de estados. O procedimento e os conceitos envolvidos neste serão apresentados no Capítulo 3. Para a resolução dos problemas de otimização não linear de fluxos em redes, necessários na primeira etapa do método, foi utilizado um método de otimização originalmente desenvolvido por Lyra (1984), que será detalhado no Capítulo 4.

Foram desenvolvidos ainda um conjunto de procedimentos específicos para a solução do problema de redução de perdas por reconfigurações em redes de grande porte. Esses desenvolvimentos incluem um conjunto de conceitos para controle de ramificações das buscas informadas em grafos e concepção e análise de funções heurísticas para estimativa de perdas além da aplicação seletiva do método de otimização. Estes procedimentos são caracterizados como "metaconhecimento" associado ao problema e serão apresentados no Capítulo 6.

Estudos de casos envolvendo a aplicação da primeira abordagem em redes reais de grande porte serão apresentados nos Capítulos 5 e 6.

Capítulo 3

Abordagem por Busca em Grafos

Este capítulo apresenta uma discussão dos principais conceitos envolvidos em alguns procedimentos de busca utilizados para se encontrar uma solução de menores perdas ativas para o problema (\mathcal{P}_1), descrito no Capítulo 2.

Algumas características gerais de buscas em grafos serão abordadas na Seção 3.1. A Seção 3.2 discute as principais idéias dos procedimentos de busca do tipo backtracking que deram origem ao procedimento de busca que é o objeto central de estudo deste trabalho: a busca heurística modular. Este procedimento é detalhado na Seção 3.3. Na Seção 3.4 será detalhado um procedimento de busca local: o ajuste fino baseado na idéias do método de troca de ramos (Civanlar et al., 1988) que utiliza o algoritmo de cálculo de fluxo de carga desenvolvido por Baran e Wu (1989a). Este procedimento tenta reduzir a solução de menores perdas encontrada pela busca heurística modular, considerando os fluxos de potência reativa ao calcular os fluxos de carga na rede.

3.1 Buscas em Grafo

Alguns conceitos usados na área de inteligência artificial (IA) para a resolução de problemas de busca podem ser usados para se tentar encontrar configurações radiais que minimizam as perdas em redes de distribuição de energia elétrica. Um destes conceitos é o processo de busca em espaço de estados desenvolvido por (Cavellucci, 1998).

No caso do problema de minimização de perdas em redes, cada configuração de rede com distribuição ótima de fluxos que se pode obter ao resolvê-lo caracteriza um estado. Para o mesmo problema, as várias configurações de rede com distribuição ótima de fluxos caracteriza um espaço de estados.

Nesse processo de busca, o estado inicial pode ser identificado com a solução do problema (\mathcal{P}_1) com a restrição de radialidade relaxada (que será identificado como $(\mathcal{P}_1)_r$), ou seja, a configuração da rede de distribuição em anéis com todos os arcos fechados. Os estados finais podem ser identificados como aqueles que caracterizam as soluções de redes radiais. Entre o estado inicial e os estados finais estão os chamados estados intermediários que caracterizam soluções ineficazes no processo de busca. Estes são identificados com aquelas soluções obtidas a cada abertura de arco para dissolução de um ciclo (como não satisfazem a restrição de radialidade, ainda são soluções ineficazes para (\mathcal{P}_1)). O nó objetivo é o nó final que contém a melhor solução para o problema de busca.

A representação do processo de busca se dá através de uma estrutura de árvore. A Figura 3.1 apresenta a construção de uma árvore de busca, se considerado o problema de mínimas perdas em redes de distribuição, onde cada nó representa uma configuração de rede.

Em geral, para que um novo estado possa ser criado, há a necessidade de se aplicar regras, baseadas nas características relevantes do problema. As regras aplicadas são denominadas “regras de produção ” e o método que seleciona quais regras de produção deverão ser aplicadas é chamado de “estratégia de controle” (Pearl, 1984).

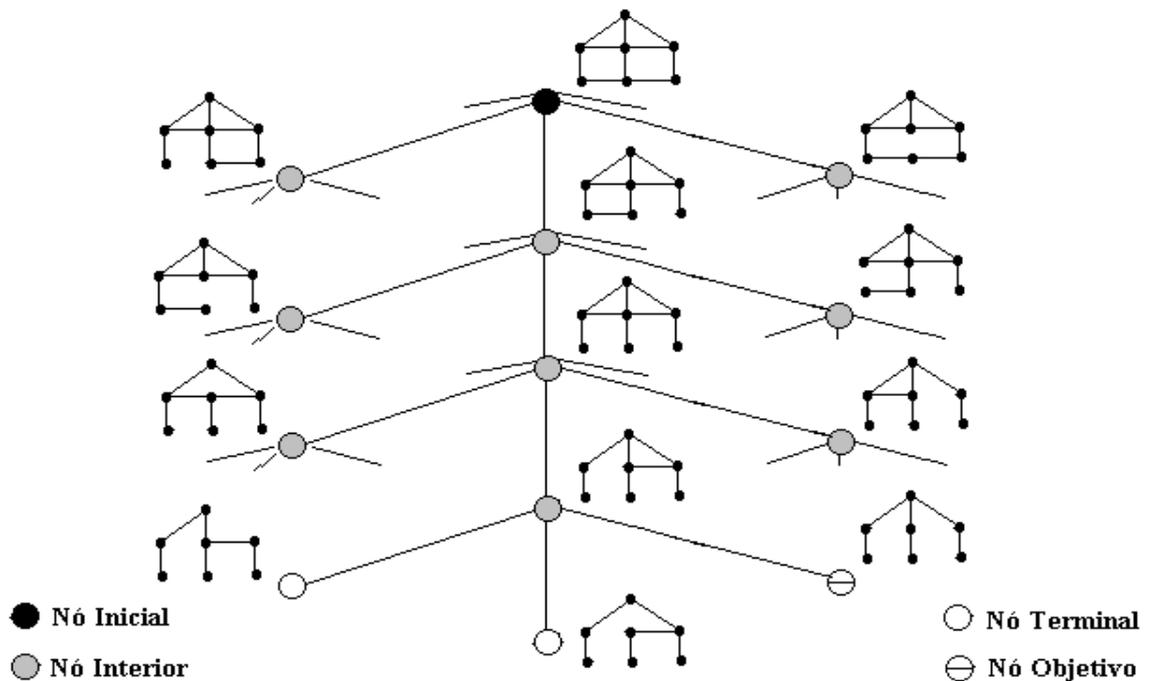


Figura 3.1: Árvore de busca para obtenção de solução de mínimas perdas

Os procedimentos de busca no espaço de estados caracterizam-se como processos sistemáticos de tentativas de aplicação de regras de produção, até encontrar-se o estado final. A estratégia de controle seleciona as regras, mantém o registro da sequência das regras já experimentadas e armazena os estados já avaliados. Utilizando estratégias de controle diferentes, pode-se obter procedimentos de busca distintos que podem ser classificados em desinformados ou informados (Pearl, 1984). Nas buscas desinformadas a ordem de geração dos nós não é influenciada pelas informações adquiridas ao longo da busca. As buscas informadas procuram usar todo o conhecimento disponível sobre o problema a ser resolvido, além de estimativas sobre a porção do espaço de estados ainda não explorada, para guiar o procedimento de busca em direções mais promissoras. Procedimentos de buscas bem sucedidos são caracterizados pela habilidade de se descobrir um caminho (a solução) do nó inicial

até o nó objetivo com exploração de apenas uma pequena porção do espaço de estados.

A próxima seção discute os procedimentos de busca backtracking informada e busca backtracking heurística propostas por Cavellucci e Lyra (1997), baseados nas estratégias de controle do tipo backtracking. As idéias destes procedimentos geraram um novo algoritmo de busca, apresentado na Seção 3.3, que associado ao procedimento de troca de ramos (Civanlar et al., 1988) originou um método eficiente para a solução do problema de mínimas perdas para reconfiguração de redes de distribuição.

3.2 Procedimentos de Buscas Backtracking

3.2.1 A Busca Backtracking

A busca backtracking é uma variação da busca em profundidade que procura soluções utilizando o procedimento de geração de nós sucessores do tipo “último gerado, primeiro a ser explorado” (Pearl, 1984). A busca é iniciada no nó raiz da árvore de busca e procura encontrar o caminho da solução gerando um sucessor a cada nó explorado. Portanto, a profundidade da árvore é aumentada até que um nó final seja atingido. Se o nó final atingido for diferente do nó objetivo, a busca retorna para o nó mais próximo do caminho já percorrido e que ainda tenha possibilidades de ser explorado. Nesta condição, gera um novo sucessor e continua expandindo o caminho de exploração até que o nó objetivo seja encontrado, terminando a busca.

A Figura 3.2 apresenta um exemplo de árvore de exploração da busca backtracking. O nó 6 é um nó final, que após percorrer o caminho formado pelos nós 1, 2, 3, 4 e 5, retorna ao nó 5, para assim continuar a busca. Neste caso, o nó objetivo é o nó 22, e o caminho percorrido pela busca até chegar a ele é o indicado pela sequência de setas.

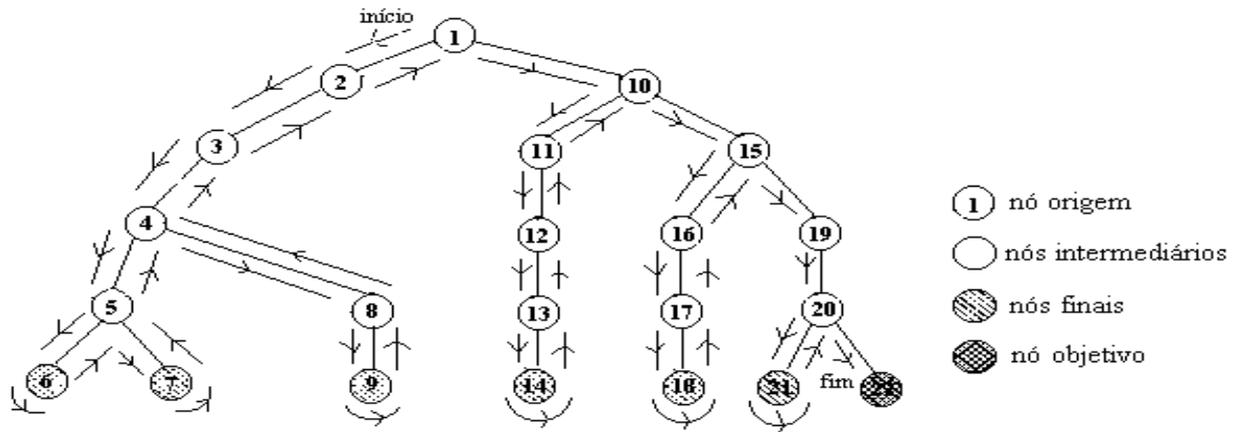


Figura 3.2: Exemplo de árvore de exploração da busca backtracking

É bom observar que o procedimento de busca backtracking percorre todo o espaço de estados, em busca da solução ótima. Porém, por explorar toda a árvore de busca, o esforço computacional cresce exponencialmente com a dimensão do problema. Foi este ponto que motivou o desenvolvimento da busca backtracking informada (Cavellucci and Lyra, 1997), um procedimento baseado na busca backtracking e que faz uso do conhecimento sobre as soluções já obtidas.

3.2.2 A Busca Backtracing Informada

O procedimento da busca backtracking informada é baseada na busca backtracking e no conhecimento do problema para que se possa detectar possíveis configurações finais de rede cujas soluções correspondentes não ofereçam redução de perdas. Detectando antecipadamente estes casos, pode-se podar subconjuntos de nós da árvore de busca, sem explorá-los explicitamente. Com isso, o esforço computacional pode ser reduzido sensivelmente.

Inicialmente, uma solução factível de perdas associada a uma configuração radial é adotada como uma solução referência. Uma nova configuração é obtida removendo-se um ciclo pela abertura do arco de menor fluxo (Cavellucci and Lyra, 1997): caracteriza-se a geração

de um novo nó n na árvore de busca. Sempre que a busca encontrar um nó final com valor de solução menor, a solução de referência é atualizada.

Iremos denotar por $(\mathcal{P}_1)_r$ o problema de minimização de perdas para redes de distribuição elétrica, com restrição de radialidade relaxada:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \quad \sum_{k \in A} r_k * x_k^2 \\
 (\mathcal{P}_1)_r \quad & \text{sa} \\
 & Ax = b; \\
 & \underline{x} \leq x \leq \bar{x}.
 \end{aligned}$$

O valor das perdas na solução referência será denotado por S . O valor da solução de $(\mathcal{P}_1)_r$ no nó n será denotado por $f(n)$. A lista de arcos ordenados pelo critério do arco de menor valor de fluxo será denotada por ABERTO. A pilha que contém a sequência de nós explorados será denotada por CAMINHO. A sequência de passos abaixo descreve a busca backtracking informada.

- Passo 0 Inicialize a variável S com o valor para perdas associado a uma configuração radial de operação conhecida para a rede de distribuição.
- Passo 1 Resolva o problema $(\mathcal{P}_1)_r$ para a configuração de rede associada ao nó; coloque em ABERTO a lista de arcos que formam anéis em ordem decrescente dos valores dos fluxos (o arco de menor fluxo fica no topo da pilha ABERTO).
- Passo 2 Se ABERTO está vazia, pare—o nó objetivo já foi encontrado; caso contrário continue a expandir o caminho de exploração;
- Passo 3 Gere um novo nó n , retirando (abrindo) o arco do topo da pilha ABERTO e resolvendo o problema $(\mathcal{P}_1)_r$ associado a rede resultante, obtendo a nova distribuição ótima de fluxos e o total de perdas associado, $f(n)$; adicione n a pilha CAMINHO.

- Passo 4 Compare o valor $f(n)$ com S ; se $f(n) \geq S$, descarte o novo nó gerado, removendo-o da pilha CAMINHO, e volte ao *Passo 2* (pode o caminho e retorne); caso contrário, se $f(n) < S$, continue.
- Passo 5 Identifique os ciclos na rede associada ao nó n , coloque no topo de ABERTO a lista de arcos que formam anéis, em ordem decrescente dos valores de fluxos e volte ao *Passo 2*; se não existirem anéis na rede associada ao nó n , continue.
- Passo 6 Substitua S por $f(n)$, guarde a solução associada ao nó n e retire o nó do topo da lista CAMINHO, para assim retornar no caminho de exploração e continuar ao longo de novas direções. n é o nó com menor valor de perdas encontrado até o momento; volte para o *Passo 2*.

A busca backtracking informada é um algoritmo admissível, tal como a busca backtracking. Como as perdas aumentam à medida que cada arco é aberto para a eliminação de um anel, se as perdas encontradas no nó n são maiores do que as de uma solução referência, a busca poda o caminho e retorna evitando continuar a exploração ao longo de direções que não levariam a um nó objetivo.

Informações adicionais podem ser incluídas na busca backtracking informada, por meio de uma função heurística, permitindo uma melhor avaliação das possibilidades de poda dos caminhos de solução existentes a partir do nó n . A idéia da antecipação da poda, por meio de avaliação da função heurística, pode levar a uma redução dos tempos computacionais de execução, motivando o desenvolvimento do procedimento da busca backtracking heurística (Cavellucci and Lyra, 1997).

3.2.3 A Busca Backtracking Heurística

O valor da função $f(n)$, utilizada na busca backtracking informada, permite avaliar a possibilidade de poda dos caminhos de solução existentes a partir do nó n . Esta avaliação

considera a configuração de rede obtida pelo caminho construído no processo de busca, do nó inicial até o nó n . Pode-se incluir também na função $f(n)$ uma estimativa das perdas a serem obtidas entre o nó n e um nó final. Esta estimativa pode ser definida por uma função heurística com o objetivo de antecipar as podas.

Cavellucci e Lyra (1997) fizeram uso da função $f_h(n)$ como função heurística para os testes realizados em seus trabalhos. Definindo-se $g(n)$ como o acréscimo de perdas da configuração da rede obtida a partir do nó inicial até o nó n , $c(n)$ como o número de anéis em n e \bar{l} como uma estimativa do aumento médio de perdas com a abertura de anéis do nó n até o nó final, a função heurística é dada por:

$$f_h(n) = g(n) + h(n), \quad (3.1)$$

onde $h(n) = \bar{l} \cdot c(n)$.

Note que a segunda parcela da função heurística $f_h(n)$ é uma estimativa das perdas a partir do nó n até o final, que pode ser projetada a partir do número de anéis presentes na configuração associada ao nó n .

A Figura 3.3 mostra o conceito da função de avaliação $f_h(n)$.

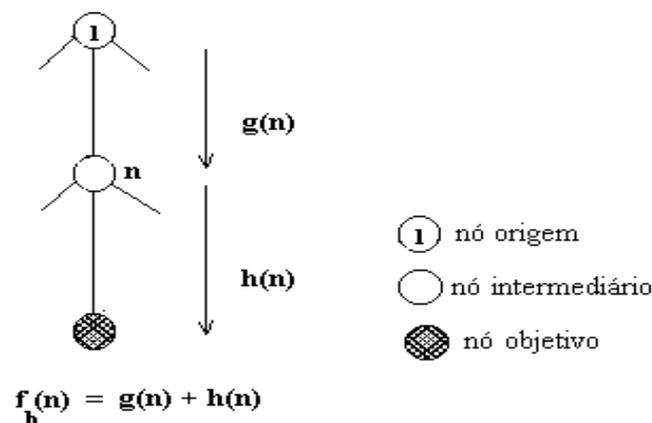


Figura 3.3: Definição da função de avaliação para a busca backtracking heurística

Quando $h(n)$ é uma boa estimativa das perdas adicionais ao longo do caminho que está sendo explorado, pode-se realizar podas muito mais cedo. Isto permite reduzir a parcela do espaço de estados gerados, permitindo a obtenção de caminhos mais curtos do nó inicial até um nó solução. No Capítulo 6 serão apresentados dois tipos diferentes de estimativas para a função $h(n)$, caracterizando a função heurística $f_h(n)$ para este trabalho.

Na busca backtracking heurística, a função de avaliação $f_h(n)$ substitui a função $f(n)$ nos *Passos 3, 4 e 6* da busca backtracking informada. Note que a função de avaliação $f(n)$, na busca backtracking informada, corresponde a função $g(n)$ na busca backtracking heurística. Abaixo a sequência de passos que define a busca backtracking heurística.

Passo 0 Inicialize a variável S com o valor para perdas associado a uma configuração radial de operação conhecida para a rede de distribuição.

Passo 1 Resolva o problema $(\mathcal{P}_1)_r$ para a configuração de rede associada ao nó; coloque em ABERTO a lista de arcos que formam anéis em ordem decrescente dos valores de fluxos (o arco de menor fluxo fica no topo da pilha ABERTO).

Passo 2 Se ABERTO está vazia, pare—a rede radial factível de menores perdas que pode ser obtida pela busca já foi encontrada; caso contrário continue a expandir o caminho de exploração.

Passo 3 Gere um novo nó n , retirando (abrindo) o arco do topo da pilha ABERTO e resolvendo o problema $(\mathcal{P}_1)_r$ associado a rede resultante para obter a nova distribuição ótima de fluxos e o total de perdas associado, $g(n)$; adicione n a CAMINHO e calcule $f_h(n) = g(n) + h(n)$.

Passo 4 Compare o valor $f_h(n)$ com S ; se $f_h(n) \geq S$, descarte o novo nó gerado, removendo-o da pilha CAMINHO, e volte ao *Passo 2*, podando o caminho e retornando; caso contrário, se $f_h(n) < S$, continue.

Passo 5 Identifique os ciclos na rede associada ao nó n , coloque no topo de ABERTO a lista de arcos que formam anéis, em ordem decrescente dos valores de fluxos e volte ao *Passo 2*; se não existirem anéis na rede associada ao nó n , continue.

Passo 6 Substitua o valor de S pelo valor de $g(n)$ (neste ponto da busca, $h(n) = 0$ e, conseqüentemente, $f_h(n) = g(n)$); guarde a solução associada ao nó n e retire o nó do topo da lista CAMINHO, para retornar no caminho de exploração e continuar ao longo de novas direções (n é o nó associado a rede radial factível com menor valor para perdas, encontrado até o momento); volte para o *Passo 2*.

É bom observar que quando $h(n) = 0$, no *Passo 3* do algoritmo, a busca backtracking heurística tem o mesmo comportamento da busca backtracking. Assim, garante-se a admissibilidade do algoritmo. No entanto, não há garantia de que o a árvore recobridora factível ótima seja encontrada, caso $h(n)$ superestime as perdas. Na prática deve-se ajustar o valor da função $h(n)$ de forma a garantir-se a admissibilidade do algoritmo.

A seguir será introduzida a busca heurística modular, objeto central de estudo deste trabalho. Em linha gerais, é uma estratégia de busca que utiliza os mesmos conceitos da busca backtracking heurística mas que difere desta por possibilitar a não exploração inicial de nós que possivelmente levariam a caminhos a serem podados ao longo da busca. Este controle é feito considerando-se apenas um subconjunto do conjunto total de arcos a serem abertos em cada ciclo. É o que será apresentado com mais detalhes na próxima seção.

3.3 A Busca Heurística Modular

A busca backtracking heurística considera todas as possibilidades de abertura de arcos na dissolução dos ciclos. No entanto, alguns nós serão explorados desnecessariamente pois levarão a caminhos que poderão ser podados ao longo da busca. Visando explorar um número qualitativo de nós que garantam caminhos mais promissores, desenvolveu-se a busca

heurística modular.

A busca heurística modular utiliza os mesmos procedimentos da busca backtracking heurística, mas considera um subconjunto do conjunto total de arcos com menor fluxo no ciclo a ser desfeito, como um fator inicial de poda. Esse subconjunto será caracterizado pelo parâmetro p , por onde passam os menores valores de fluxos da rede. Além de definir a estratégia de controle de busca em profundidade, p também define o critério de geração do próximo nó a ser explorado, controlando a largura máxima da árvore de busca.

A cada iteração, um arco k é retirado do topo da lista ABERTO e é incluído na lista CAMINHO, caracterizando o início da exploração das soluções que não irão incluir o arco k . Prepara-se o problema sucessor $(\mathcal{P}_1)_r$, a ser detalhado no Capítulo 4, criando-se uma nova configuração (\bar{n}) que corresponderá à configuração do nó n com a retirada do arco k . Para o cálculo do novo valor da função heurística $f_h(\bar{n})$ resolve-se um problema de fluxo de custo mínimo não linear para a configuração \bar{n} . Neste trabalho, este problema será resolvido pelo método do gradiente reduzido para fluxos em redes, também a ser detalhado no Capítulo 4.

Se o valor de $f_h(\bar{n})$ é menor que o valor da solução de referência S , a busca continua ao longo do caminho, chamando recursivamente o procedimento da busca heurística modular, para o próximo nível na árvore de buscas. Caso contrário, se o valor da função heurística $f_h(\bar{n})$ indica que o caminho em exploração não é promissor, realiza-se uma poda por dominância na árvore de buscas; para isso retira-se o arco k da lista CAMINHO e faz-se o backtracking, decrementando-se de uma unidade o nível da árvore de buscas.

O procedimento de busca heurística modular é repetido até que todos os nós promissores em cada nível, especificado pelo parâmetro p , sejam explorados, ou até que não haja mais arcos na lista ABERTO.

Como na busca backtracking heurística, quando não houver mais ciclos, um nó terminal foi encontrado. Se o valor da função heurística $f_h(n) = g(n) + h(n)$ associada ao nó n for menor do que o valor das perdas obtidas na configuração inicial de referência (variável S), o caminho da nova solução é armazenado e o novo valor da solução de perdas é substituído

em S . A busca está concluída para este caminho de busca.

Considerando-se então a função $f_h(n) = g(n) + h(n)$ construída para a busca backtracking heurística, a busca heurística modular pode ser obtida alterando-se os *Passos 1 e 5*, originais da busca backtracking heurística, pelos passos definidos abaixo.

Passo 1 Resolva o problema $(\mathcal{P}_1)_r$ para a configuração de rede associada ao nó; coloque em ABERTO a lista de p arcos que formam anéis, em ordem decrescente dos valores dos fluxos e neste caso, os arcos não devem ser ordenados de acordo com outro critério.

Passo 5 Identifique os ciclos na rede associada ao nó n , coloque no topo de ABERTO a lista de p arcos que formam anéis, em ordem decrescente dos valores de fluxos e volte ao *Passo 2*; se não existirem anéis na rede associada ao nó n , continue.

Como ilustração de árvore de busca para a busca heurística modular, se tomarmos o parâmetro p igual a um, o método será idêntico ao de abertura sequencial de chaves, desenvolvido por (Merlin and Back, 1975) (Seção 1.4.1), como mostra a Figura 3.4.

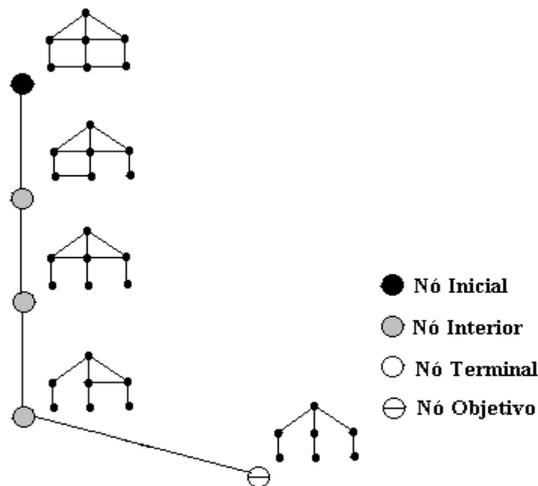


Figura 3.4: Abertura sequencial de arcos como processo de busca em espaço de estados

Quando o parâmetro p corresponder a todas as possibilidades de abertura de ciclos, a busca heurística modular coincidirá com a busca backtracking heurística desenvolvida por (Cavellucci and Lyra, 1997).

A Figura 3.5 ilustra uma árvore de busca para a busca heurística modular com parâmetro p igual a dois.

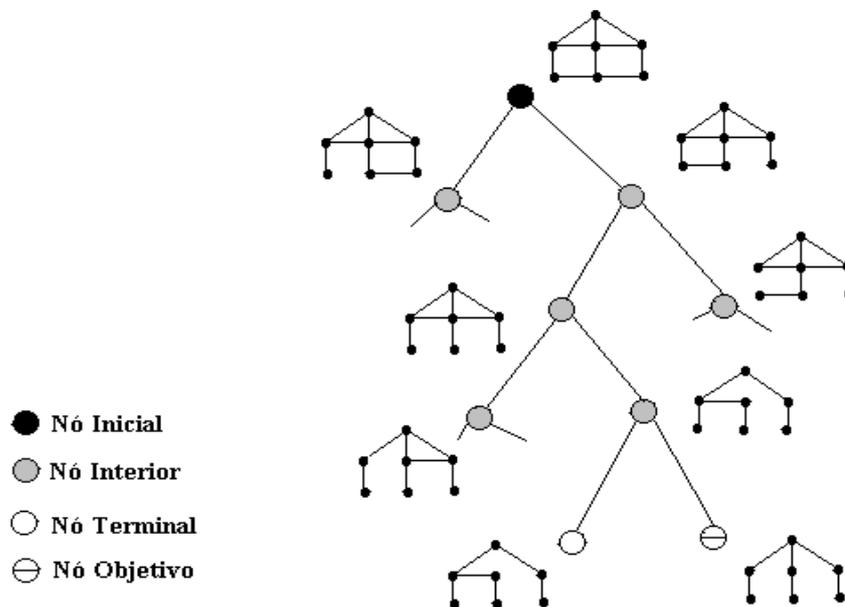


Figura 3.5: Árvore de busca para $p = 2$, na busca heurística modular

Após a obtenção da melhor solução através da busca heurística modular procede-se uma busca local na vizinhança dessa melhor solução. Esta busca local caracteriza uma segunda etapa na resolução do problema de redução de perdas e será feita por um algoritmo baseado nas idéias do método da troca de ramos desenvolvido por (Civanlar et al., 1988), utilizando-se o algoritmo desenvolvido por (Baran and Wu, 1989a). Em linhas gerais, o algoritmo considera a possibilidade de se tratar eventuais problemas de trechos mal compensados nas redes, incluindo o cálculo com fluxos de potência reativa. É o que será apresentado a seguir.

3.4 Ajuste Fino por Troca de Ramos

Através da aplicação da busca heurística modular visou-se encontrar uma solução radial de menores perdas para o problema (\mathcal{P}_1) . O próximo passo é realizar um refinamento nesta melhor solução radial através de uma busca local. Neste passo, iremos realizar um ajuste fino na solução obtida que irá considerar eventuais trechos mal compensados que possam existir na rede.

Este ajuste fino será realizado pelo método da troca de ramos como proposto por Baran e Wu (1989a). O método obtém redução de perdas através da operação de abertura e fechamento de chaves que proporcione a maior redução de perdas. Inicialmente iremos mostrar os cálculos exigidos no método, usando para exemplificação a Figura 3.6. Após a apresentação dos cálculos, serão descritos os passos do algoritmo utilizado.

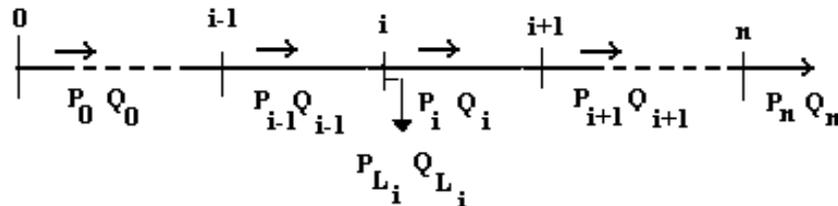


Figura 3.6: Rede radial contendo um alimentador

A Figura 3.6 ilustra a representação dos fluxos de potência ativa e reativa em uma rede radial de distribuição de um alimentador. As cargas ativas e reativas nos arcos i (P_{L_i} , Q_{L_i}) são consideradas constantes.

Para os cálculos dos fluxos de potência ativa e reativa, exigido no método, iremos utilizar as Equações 2.5 e 2.6, especificadas no Capítulo 2:

$$P_{i+1} = P_i - P_{L_{i+1}} \quad e \quad Q_{i+1} = Q_i - Q_{L_{i+1}}.$$

Para o cálculo das tensões nos nós i , que são extremos dos arcos abertos, utilizaremos:

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + y_i Q_i). \quad (3.2)$$

Nesta equação, V_i é a tensão no nó i , P_i e Q_i são os fluxos de potência ativa e reativa, respectivamente, no arco i . A resistência e a impedância da linha i são denotadas por r_i e y_i , respectivamente.

A partir dessas equações, o algoritmo de troca de ramos de Baran e Wu (1989a), é resumido na sequência de passos abaixo.

Passo 0 Encontrar a melhor solução radial para o problema de minimização de perdas através da busca heurística modular e calcular os valores das tensões para os nós correspondentes às extremidades dos arcos abertos.

Passo 1 Para cada arco aberto b que apresentar uma diferença de tensão significativa entre seus terminais, fazer:

Fechar esse arco e identificar o ciclo formado na rede;

Percorrer o ciclo, a partir do terminal de maior diferença de potencial, e encontrar o arco (arco m) cuja abertura proporcionará a maior redução de perdas (ΔP_{bm});

Se não existir arcos com quedas de tensão significativas entre seus terminais, pare — o processo de troca de arcos está concluído. Caso contrário, vá para o *Passo 2*.

Passo 2 Realizar a operação de chaveamento (fechamento de b e abertura de m) que proporcione a maior redução de perdas (ΔP_{bm}) na rede, calculada através de 3.3:

$$\begin{aligned} \Delta P_{bm} = & 2P_m \left(\sum_{i \in \mathcal{L}} r_i P_i - \sum_{i \in \mathcal{R}} r_i P_i \right) + \\ & + 2Q_m \left(\sum_{i \in \mathcal{L}} r_i Q_i - \sum_{i \in \mathcal{R}} r_i Q_i \right) - (P_m^2 + Q_m^2) \left(\sum_{i \in \mathcal{L} \cup \mathcal{R}} r_i \right), \end{aligned} \quad (3.3)$$

onde \mathcal{L} é o conjunto que contém os arcos do ciclo entre os nós $\{0, \dots, k-1, k\}$ e \mathcal{R} é o conjunto que contém os arcos entre os nós $\{0, \dots, n-1, n\}$ e k .

Passo 3 Atualizar os valores das tensões e voltar ao *Passo 1*.

A Figura 3.7 ilustra o procedimento de redução de perdas por troca de ramos em um determinado anel:

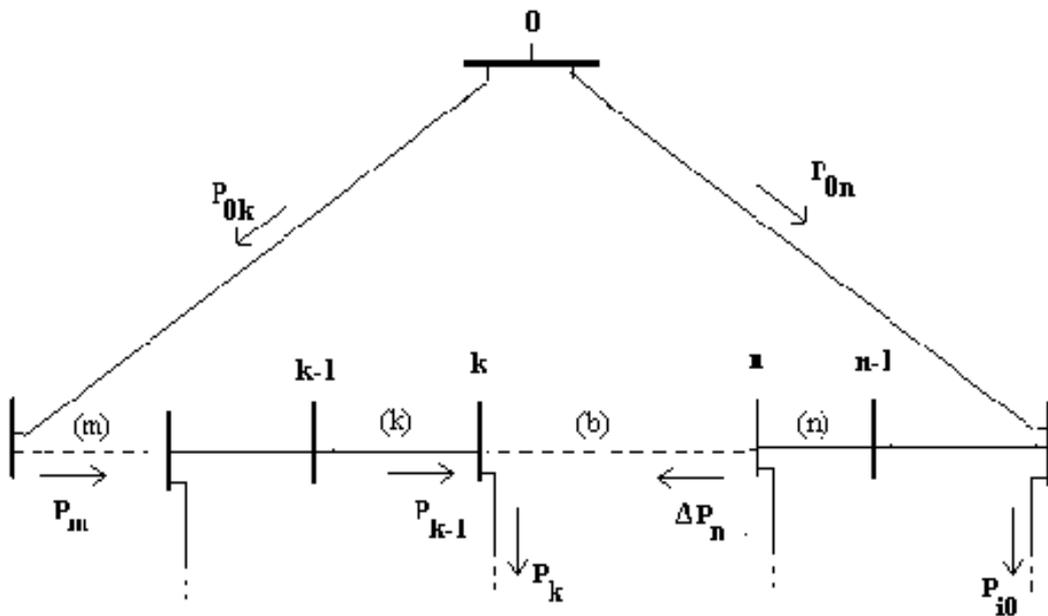


Figura 3.7: Ajuste fino por troca de ramos

No próximo capítulo serão detalhados o método de otimização adotado para resolução do problema (\mathcal{P}_1) com restrição de radialidade relaxada e o procedimento que prepara o problema relaxado para o próximo nível na árvore de buscas. Também serão detalhados os procedimentos necessários para adequar os métodos desenvolvidos no Capítulo 3 para aplicação em redes reais.

Capítulo 4

Solução do Problema Relaxado e Procedimentos de Otimização para Redes Reais

Este capítulo aborda a resolução do problema $(\mathcal{P}_1)_r$, caracterizado pela relaxação da restrição de radialidade do problema (\mathcal{P}_1) . A resolução do problema $(\mathcal{P}_1)_r$ implica em se encontrar os fluxos ótimos na rede associada a este problema. Teoricamente, pode-se encontrar os fluxos ótimos através de qualquer método para otimização de funções não lineares com restrições (Luenberger, 1984). Neste trabalho utilizou-se uma especialização do método do Gradiente Reduzido para Fluxos em Redes com função objetivo não linear, originalmente desenvolvido por Lyra (1984). Este método será descrito na Seção 4.1.

Na Seção 4.2 será mostrado o procedimento de penalização utilizado por Cavellucci e Lyra (1997) e será apresentado o procedimento, denominado ampliação das condições de otimalidade dos fluxos, desenvolvido neste trabalho. Ambos são usados para a preparação de problemas relaxados $(\mathcal{P}_1)_r$ para estados sucessores. Serão apresentados alguns resultados computacionais envolvendo os dois procedimentos. Estes resultados destacam as boas

qualidades do procedimento de ampliação das condições de otimalidade dos fluxos.

Na Seção 4.3 serão apresentados os procedimentos para adequar os métodos desenvolvidos para aplicação em redes reais de dimensão grande.

4.1 Solução do Problema de Otimização Relaxado $(\mathcal{P}_1)_r$

O método do Gradiente Reduzido para Fluxos em Redes (Cavellucci and Lyra, 1997) é utilizado para a obtenção da distribuição ótima de fluxos com perdas mínimas para o problema relaxado $(\mathcal{P}_1)_r$.

4.1.1 O Método do Gradiente Reduzido para Fluxos em Redes

Iremos considerar como $(\mathcal{P}_1)_r$ o problema de otimização de fluxos (\mathcal{P}_1) em uma rede de distribuição cuja restrição de radialidade está relaxada. Este problema pode ser descrito como:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } \phi(x) = \sum_{k \in A} r_k * x_k^2 \\
 (\mathcal{P}_1)_r \quad & \text{sa} \\
 & Ax = b \\
 & \underline{x} \leq x \leq \bar{x}
 \end{aligned}$$

O método do gradiente reduzido para fluxos em redes (GRF) particiona a variável x do problema em dois conjuntos: o conjunto das variáveis dependentes, representado por I , e o conjunto das variáveis independentes, representado por J (Luenberger, 1984). Será utilizada a mesma terminologia de programação linear, denominando o conjunto I “base”, as variáveis dependentes “básicas” e as variáveis independentes “não básicas” (Lyra, 1984).

Serão consideradas as seguintes notações adicionais:

x_J : vetor de fluxos com componentes x_k , $k \in J$;

x_I : vetor de fluxos com componentes x_i , $i \in I$;

A^k : coluna k da matriz A ;

A^I : matriz formada pela união das colunas k , $k \in I$;

$\nabla_I \phi(x)$: vetor de derivadas parciais $\delta \phi(x) / \delta x_k$, $k \in I$;

$\lambda(x)$: vetor multiplicador associado a base I .

As variáveis do conjunto dependente devem satisfazer a condição de não-degenerescência, caracterizada pelo fato de que os arcos associados a x_I devem formar uma árvore geradora para a rede e satisfazer $\underline{x}_I < x_I < \bar{x}_I$. O vetor λ é denominado “vetor de potenciais”.

Dado um vetor x_0 de fluxos e uma partição (I, J) , o método do gradiente reduzido para fluxos em redes é caracterizado pela seguinte sequência de passos:

Passo 0 Calcule todas as derivadas parciais da função ϕ .

Passo 1 Obtenha as variáveis duais λ , através da solução do sistema algébrico de equações lineares $\lambda(x)A^I = \nabla_I \phi(x)$.

Passo 2 Obtenha as componentes do gradiente reduzido ρ_i ($i \in I$),

$$\rho_i = \partial \phi(x) / \partial x_i - (\lambda_p - \lambda_q)$$

onde λ_p e λ_q são, respectivamente, as variáveis duais associadas ao nó origem (p) e nó destino (q) do arco a_i .

Passo 3 Faça, $\forall i \in J$,

$$\Delta x_i = \begin{cases} \rho_i, & \text{se } \underline{x}_i < x_i < \bar{x}_i \\ & \text{ou } x_i = \underline{x}_i \text{ e } \rho_i \leq 0 \\ & \text{ou } x_i = \bar{x}_i \text{ e } \rho_i \geq 0 \\ 0, & \text{se } x_i = \underline{x}_i \text{ e } \rho_i \geq 0 \\ & \text{se } x_i = \bar{x}_i \text{ e } \rho_i \leq 0 \end{cases}$$

Passo 4 Se $\Delta x_J = 0$, pare; o vetor atual de fluxos é ótimo—satisfaz as condições de otimalidade de Kuhn-Tucker, para problemas de otimização com restrições (Luenberger, 1984). Caso contrário, encontre as componentes dependentes da direção de busca Δx_I ,

$$\Delta x_I = \sum_{i \in J} (-\hat{A}^i) \Delta x_i$$

onde \hat{A}^i é a solução do sistema de equações algébricas lineares

$$A^I \hat{A}^i = A^i$$

Passo 5 Encontre

$$\alpha_1 = \text{Max}\{\alpha \text{ tal que } \underline{x}_I \leq x_I - \alpha \Delta x_I \leq \bar{x}_I\}$$

$$\alpha_2 = \text{Max}\{\alpha \text{ tal que } \underline{x}_J \leq x_J - \alpha \Delta x_J \leq \bar{x}_J\}$$

$$\alpha_3 = \text{Min}\{\phi(x - \alpha \Delta x) \text{ tal que } 0 \leq \alpha \leq \alpha_1 \text{ e } 0 \leq \alpha \leq \alpha_2\}$$

Atualize x , $x \leftarrow (x - \alpha_3 \Delta x)$.

Passo 6 Se $\alpha_3 < \alpha_1$, volte para o *Passo 0*. Caso contrário, procure um arco a_c cujo fluxo satisfaça a condição $\underline{x}_c < x_c < \bar{x}_c$ e que forme uma nova árvore geradora quando substituir o arco que sairá da árvore atual, a_l , por seu fluxo ter atingido um de seus limitantes; atualize a partição (I, J) ,

$$I \leftarrow I - \{l\} + \{c\} \text{ e } J \leftarrow J - \{c\} + \{l\}$$

e volte para o *Passo 0*.

Uma das razões pela qual o método do gradiente reduzido especializado para fluxos em redes se mostra eficiente é o fato de não haver manipulações com matrizes. Isto se dá devido à representação da rede através de uma estrutura de dados que explora esta particularidade do problema. A seguir, faz-se uma apresentação dos principais aspectos da estrutura de dados utilizada.

Representação das Redes

Neste trabalho utilizou-se a representação de arco-orientado (Jensen and Barnes, 1980; Cavellucci and Lyra, 1997) para armazenar a estrutura de dados da rede de distribuição. Neste tipo de representação são usadas 2 listas indexadas pelos arcos do grafo como os elementos básicos de armazenamento. A primeira determina a lista $O = \{o_k\}$ de nós origem de cada arco k . A segunda determina a lista $D = \{d_k\}$ de nós destino de cada arco k .

Para ilustrar o armazenamento dos arcos do grafo \mathcal{G} utilizando as listas O e D , faremos uso da Figura 2.2(b), reproduzida na Figura 4.1. Por exemplo, neste grafo o arco 4 tem como nó origem o nó 3 e nó destino o nó 2, fazendo parte do 4º elemento de cada uma das listas O e D . A tabela na Figura 4.1 apresenta as listas completas para o respectivo grafo.

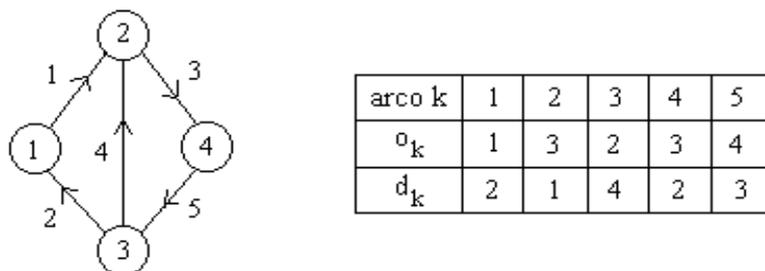


Figura 4.1: Exemplo de grafo para representação das listas O e D

Listas para armazenarem dados importantes relativos aos aspectos físicos e elétricos de cada arco do grafo \mathcal{G} podem ser criadas semelhantes às listas O e D .

Outras três listas de apontadores são utilizadas para o armazenamento da árvore recobridora do grafo \mathcal{G} e manipulações da rede: arco-pai, nó pai e fio. Estas três estruturas indicam o armazenamento de uma árvore em preordem (Jensen and Barnes, 1980; Cavellucci and Lyra, 1997). São elas:

- $P_A(i)$: apontador para o arco que liga o nó i ao seu nó antecessor (arco pai);
- $P_P(i)$: apontador para o nó antecessor ao nó i na árvore (nó pai);
- $P_F(i)$: apontador para o nó sucessor ao nó i da árvore, quando esta é percorrida em preordem (fio).

Pode-se acrescentar a este armazenamento de dados uma lista $P_N(i)$ que define o nível de profundidade de cada nó i na árvore. Este nível indica o número de nós existentes entre o nó raiz e o nó i e indicam o número total de ciclos a serem desfeitos na rede. Por definição, o nível do nó raiz é igual a zero.

A Tabela 4.1.1 ilustra as listas de armazenamento referentes a árvore representada pela Figura 4.2, em preordem. Neste exemplo, o nó raiz é o nó 1 e por definição os apontadores $P_A(1)$ e $P_P(1)$ são iguais a zero. Isto indica que não há arco predecessor e nem nó predecessor para o nó raiz. A lista P_F , que indica o fio da árvore em preordem, está graficamente representada na Figura 4.2 pela linha tracejada. A lista $P_N(i)$ está graficamente representada pelas linhas horizontais.

nó i	1	2	3	4	5	6
$P_A(i)$	0	7	8	9	10	11
$P_P(i)$	0	1	1	3	3	1
$P_F(i)$	2	3	4	5	6	-
$P_N(i)$	0	1	1	2	2	1

Tabela 4.1: Representação das listas P_A , P_P , P_F e P_N para a árvore da Figura 4.2

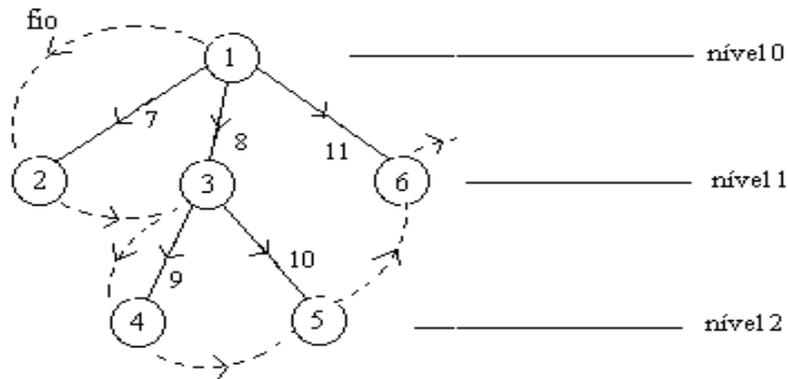


Figura 4.2: Árvore para representação das listas de armazenamento

Utilizando este tipo de armazenamento de informações dos dados das redes, podemos justificar a eficiência do método do gradiente reduzido para fluxos em redes. Os *Passos 1 e 4* são executados sem manipulações com matrizes. A resolução dos sistemas que aparecem nesses passos são realizados utilizando-se as listas P_A , P_P e P_F , o que melhora o desempenho computacional do método. Como não há inversão de matrizes, não há operações de divisão e portanto não existem erros numéricos de arredondamento, o que garante estabilidade ao método.

Interpretação Econômica

É possível fazer uma interpretação econômica do vetor de variáveis duais $\lambda(x)$ associado a uma base I e a uma distribuição de fluxo x em uma rede \mathcal{G} (Lyra, 1984).

Definição 4.1.1 *Seja $a_k = (r, s)$ o arco representado pelo k -ésima coluna da matriz A (A^k). Existe uma cadeia única (Γ_{rs}) de arcos pertencentes a árvore formada pelas variáveis básicas (\mathcal{G}_I) , representada por A^I , que liga os nós r e s .*

A componente $\nabla_k \phi(x)$ do gradiente da função ϕ , correspondente a uma certa distribuição de fluxos x na rede, indica o custo para se escoar um incremento adicional de fluxos (Δx_k)

pelo arco a_k . Se for fixado potencial nulo para o nó raiz da árvore \mathcal{G}_I , o potencial de um nó r obtido através de $\lambda_r(x) = \nabla_{rs}\phi(x) + \lambda_s(x)$ indica o custo para se passar um incremento Δx_r de fluxo através da cadeia de arcos básicos Γ_{rs} do nó r até o nó raiz. Assim, a diferença de potenciais $\lambda_r(x) - \lambda_s(x)$ entre dois nós quaisquer da rede \mathcal{G} fornece o custo de se transportar um incremento de fluxos do nó r para o nó s através da cadeia única Γ_{rs} .

Cada componente do gradiente reduzido ρ_i ($i \in J$) compara o custo de passar um incremento adicional de recursos Δx_i através do arco correspondente a variável não básica $a_i = (p, q)$ com o custo de passar o mesmo incremento ao longo da cadeia básica Γ_{pq} . Quando o custo do incremento de transporte de fluxo através de $a_i = (p, q)$ é menor, ρ_i é negativo e o método GRF aumenta o fluxo no arco a_i , diminuindo em Γ_{pq} . Se o custo do incremento através de a_i é mais caro, o processo é inverso. Tanto um movimento quanto o outro garantem melhora na função objetivo.

É interessante notar que a melhora na função objetivo não ocorre se o custo de transportar fluxo em $a_i = (p, q)$ for igual ao custo de transportar fluxo na cadeia básica Γ_{pq} . Também não há melhoras na função objetivo se o arco a_i está saturado no limite inferior e o transporte de fluxo pela cadeia básica Γ_{pq} for mais atrativo. O mesmo ocorre quando o arco a_i está saturado no limite superior e o transporte de fluxo pelo arco é mais atrativo do que o transporte pela cadeia básica Γ_{pq} .

Na próxima seção iremos apresentar a preparação do problema $(\mathcal{P}_1)_r$ para estados sucessores na árvore de busca. Será mostrada a abordagem por penalização, desenvolvida por Cavellucci e Lyra (1997) e será apresentada a abordagem por ampliação das condições de otimalidade dos fluxos, desenvolvida para este trabalho.

4.2 Solução de Problemas Sucessivos

No *Passo 3* da busca heurística modular gera-se um novo nó n através da abertura do arco k de menor fluxo eliminando-se um ciclo da rede. Antes de se encontrar a nova distribuição

ótima de fluxos para o problema $(\mathcal{P}_1)_r$ resultante, iremos realizar um movimento de fluxos no ciclo. Este movimento irá preparar uma solução factível para o problema $(\mathcal{P}_1)_r$ resultante. Chamaremos este movimento de preparação do problema relaxado $(\mathcal{P}_1)_r$ para estados sucessores na árvore de busca. Duas formas são apresentadas: abordagem por penalização e abordagem por ampliação das condições de otimalidade dos fluxos.

4.2.1 Abordagem por Penalização

Cavellucci e Lyra (1997) utilizaram penalização (Luenberger, 1984) como alternativa para preparar o problema $(\mathcal{P}_1)_r$ para estados sucessores na árvore de buscas. Antes de se obter a nova distribuição ótima de fluxos para a rede resultante no nó i da árvore de busca, Cavellucci e Lyra (1997) penalizam o custo do arco $a_l = (r, s)$ de menor fluxo que será aberto para a dissolução do ciclo.

Um ponto importante a se observar é um mal condicionamento (Luenberger, 1984) que a abordagem por penalização pode gerar no problema. Ao retirar-se o fluxo do arco a ser aberto e transportá-lo ao longo da rede, pode ocorrer que parte deste fluxo venha a passar por arcos que já foram abertos em níveis anteriores na árvore de buscas e que já estariam na otimalidade. Seriam necessárias várias iterações para que o método possa a vir restabelecer a otimalidade dos fluxos. Se a rede possuir muitos ciclos a serem desfeitos isto pode gerar um mal condicionamento do problema (Luenberger, 1984). É o que pode ser verificado nos resultados obtidos na Tabela 4.3 (Seção 4.2.3), com redes reais de dimensão grande.

Em redes de pequeno porte a metodologia da penalização do custo de arcos não gerou problemas como mostrado em Cavellucci (1998) e nos resultados obtidos na Tabela 4.3 (Seção 4.2.3). Para problemas com redes reais de dimensão grande, no entanto, a metodologia se mostrou inviável. Foi desenvolvido, então, a abordagem por ampliação das condições de otimalidade dos fluxos, a ser apresentada a seguir.

4.2.2 Abordagem por Ampliação das Condições de Otimalidade dos Fluxos

A idéia da preparação do problema $(\mathcal{P}_1)_r$ para posterior aplicação do método GRF foi a de se considerar um movimento de fluxos no ciclo que será aberto pelo arco a_k de menor fluxo. Este movimento zera o fluxo do arco a_k antecipando a projeção do gradiente reduzido correspondente sobre as restrições de canalização. Esta situação garante que o incremento unitário correspondente a variável independente (arco a_k) está na otimalidade, ao aplicar-se o método GRF após a movimentação de fluxos no ciclo, não havendo necessidade de verificação da otimalidade do fluxo do arco aberto.

Movimentação dos Fluxos

Suponha que se tenha uma rede como apresentada na Figura 4.3(a), cujos fluxos são representados pelas setas menores. Suponha ainda que se tenha um trecho correspondendo a uma árvore representado pelos nós sombreados e que o arco $a_k = (r, s)$, correspondente a uma variável independente, possua o menor valor de fluxo no ciclo a que pertence e que se quer desfazer.

Primeiramente, necessita-se de um incremento que realizará uma atualização dos fluxos nos arcos que pertencem ao ciclo a ser desfeito. Este incremento de atualização será representado aqui por Δx_{a_k} e terá como valor o fluxo do arco a_k que será aberto.

A atualização dos fluxos das variáveis pertencentes ao ciclo se dará de forma que haja um incremento $-\Delta x_{a_k}$ nos arcos com sentido (r, s) e um incremento $+\Delta x_{a_k}$ nos arcos com sentido (s, r) . A Figura 4.3(b) ilustra o movimento de fluxos no ciclo como descrito acima. Observe que a variável não básica correspondente ao arco a_k tem incremento $-\Delta x_{a_k}$, garantindo valor de fluxo nulo nesse arco.

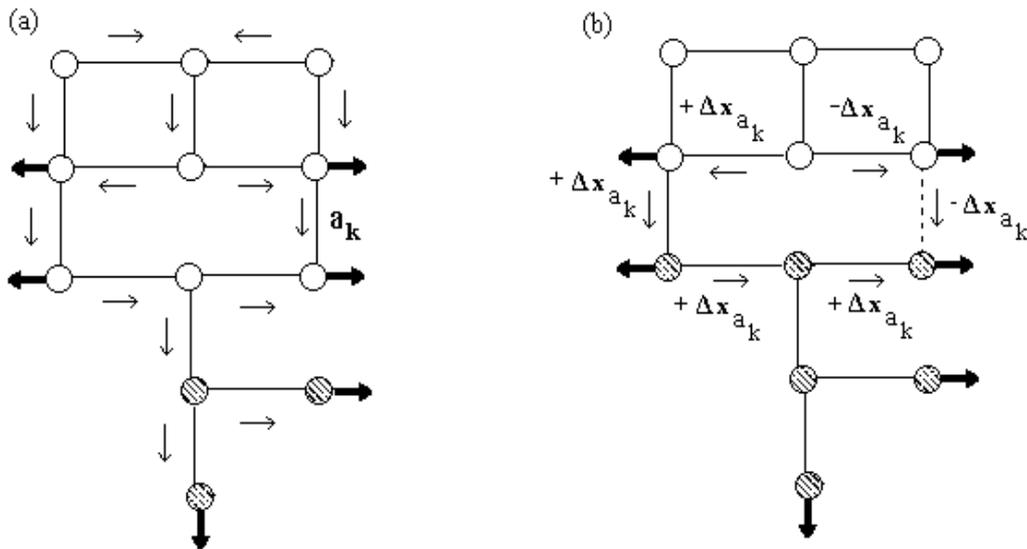


Figura 4.3: Preparação do problema $(\mathcal{P}_1)_r$ para um estado sucessor

Se o arco $a_k = (r, s)$, que possui o menor valor de fluxo no ciclo que se quer desfazer, corresponder a uma variável básica, há a necessidade de realizar uma troca de base. Para isso, escolhe-se um arco a_l , correspondente a uma variável não básica, pertencente ao ciclo que será desfeito e realiza-se uma troca de base. Garantindo que o arco a_k de menor valor de fluxo correspondente a uma variável não básica, procede-se a atualização dos fluxos, como apresentado acima.

Caso não haja um arco a_l correspondente a uma variável não básica para o procedimento de troca de base então o ciclo não poderá ser desfeito. O caminho que o método da busca heurística modular poderá tomar depende da escolha prévia do parâmetro de ramificações p (Seção 3.3).

Se o parâmetro escolhido foi $p = 1$ e não existir arco a_l , correspondente a uma variável não básica, para proceder a uma troca de base com o arco correspondente a uma variável básica a_k , então o ciclo não será desfeito e o método da BHM pára. Se o parâmetro escolhido previamente foi $p > 1$, então o método da BHM ainda tem a opção de retornar (realizando um *backtracking*). Neste caso, o método tenta explorar outros nós na árvore de busca procurando

um outro caminho para a dissolução dos ciclos que ainda existirem na rede.

Após a escolha do arco a ser aberto e a atualização de fluxos necessária como apresentado anteriormente, a rede está pronta para a obtenção da nova distribuição ótima de fluxos. Isto é mostrado na Figura 4.4, onde já se observa a rede com o novo trecho de ciclo desfeito.

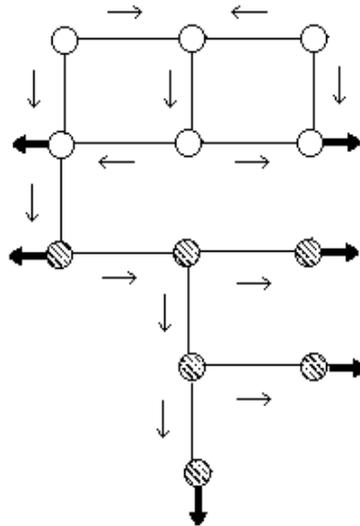


Figura 4.4: Otimalidade dos fluxos em árvores

Ao obter-se a nova distribuição ótima de fluxos associada a rede com o ciclo desfeito, não haverá necessidade do cálculo da variação unitária da variável não básica correspondente ao arco a_k (Δx_k). Basta transmitir a informação de que o incremento unitário da variável não básica já está na otimalidade. Isto pode ser feito alterando-se o *Passo 3* no método do gradiente reduzido para fluxos em redes para:

Passo 3

$$\Delta x_i = \begin{cases} \rho_i, & \text{se } \underline{x}_i < x_i < \bar{x}_i \\ & \text{ou } x_i = \underline{x}_i \text{ e } \rho_i < 0 \\ & \text{ou } x_i = \bar{x}_i \text{ e } \rho_i > 0 \\ 0, & \text{se } x_i = \underline{x}_i \text{ e } \rho_i \geq 0 \\ & \text{se } x_i = \bar{x}_i \text{ e } \rho_i \leq 0 \\ & \text{se o arco corresponde a uma chave} \\ & \text{já aberta no processo de busca} \end{cases}$$

Além do movimento de atualização dos fluxos no ciclo desfeito, há a necessidade de se marcar o arco a_k escolhido para a dissolução do ciclo. Esta marca irá prevenir dois tipos de situações indesejáveis:

- (1) o arco a_k , correspondente a uma variável não básica, que está com fluxo na otimalidade, fazer parte da lista ABERTO, caso venha pertencer a um novo ciclo a ser desfeito;
- (2) o arco a_k , correspondente a uma variável não básica, ser candidato a entrar na base quando um arco a_l , correspondente a uma variável básica, for escolhido para dissolver um outro ciclo.

Nos casos descritos acima, e sem a marca no arco a_k , tanto o fluxo quanto a respectiva variação unitária desse arco podem perder a otimalidade, já garantida na atualização de fluxos no último ciclo desfeito.

As Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 ilustram os passos realizados para a dissolução de ciclos utilizando a busca heurística modular com $p = 1$ e o procedimento de movimento dos fluxos em ciclos, em uma rede de 5 nós e 6 arcos, inicialmente com os arcos 4 e 6 abertos.

As demandas (em kW) exigidas em cada um dos nós estão indicados na Figura 4.5(a) e o carregamento total na subestação (nó 1) é de 8 kW. Iremos considerar a resistência em cada um dos arcos igual a 1Ω e tensão igual a 13,8 kV o que fornece um valor de perdas para a configuração inicial de 0,175 W.

A Figura 4.5(a) ilustra a rede em situação inicial. Após aplicação do método do gradiente reduzido para fluxos em redes na configuração inicial, foram obtidos os valores de fluxos ótimos como indicados na Figura 4.5(b).

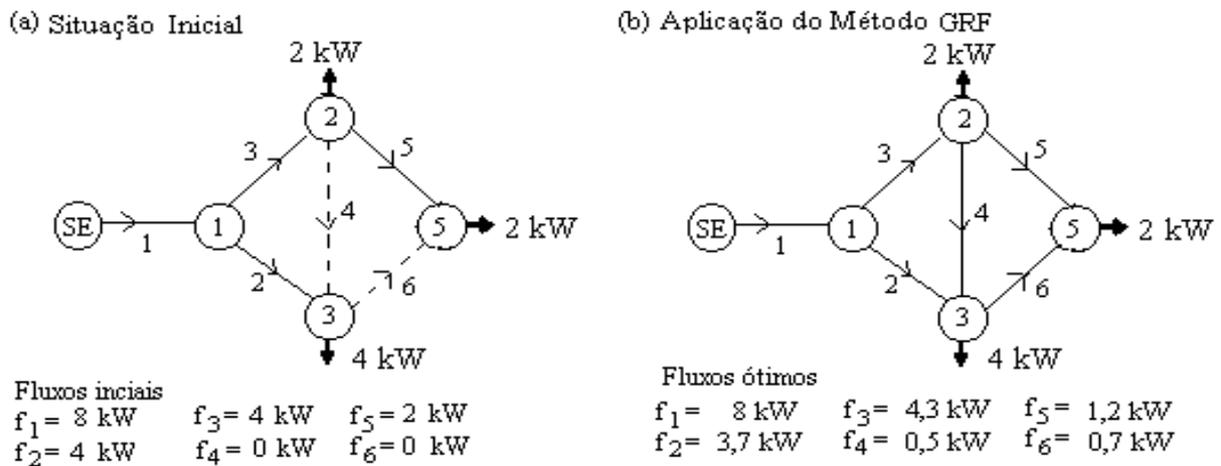


Figura 4.5: (a) Configuração inicial da rede e (b) aplicação do método do gradiente reduzido para a obtenção dos fluxos ótimos

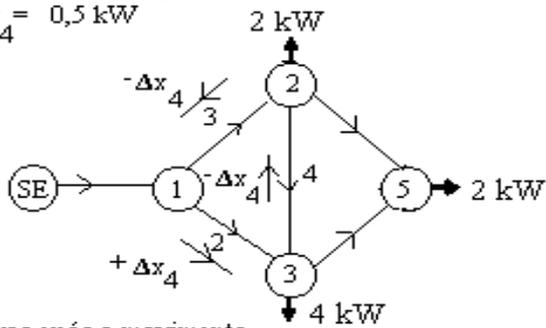
O primeiro ciclo detectado é o formado pelos arcos 2, 3 e 4. O arco que deverá ser aberto para dissolução deste ciclo é o arco 4 por possuir o menor valor de fluxo neste ciclo.

A preparação do problema $(\mathcal{P}_1)_r$ para esta situação, que inclui a movimentação dos fluxos no ciclo, está indicada na Figura 4.6(c). Nesta Figura também podem ser observados os novos valores dos fluxos obtidos no ciclo dissolvido.

A Figura 4.6(d) ilustra a nova distribuição ótima de fluxos, após a aplicação do método do gradiente reduzido para fluxos em redes, cuja configuração forneceu valor de perdas igual a 0,171 W.

O outro ciclo detectado é o formado pelos arcos 2, 3, 5 e 6. O arco que deverá ser aberto para dissolução deste ciclo é o arco 6 por possuir o menor valor de fluxo neste ciclo. A preparação do problema $(\mathcal{P}_1)_r$ para esta situação, que inclui a movimentação dos fluxos neste ciclo, está indicada na Figura 4.7(e).

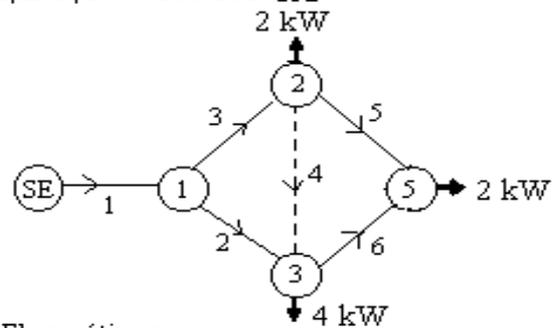
(c) Movimentação dos fluxos no ciclo :
 $\Delta x_4 = 0,5 \text{ kW}$



Fluxos após o movimento

$$\begin{aligned} f_1 &= 8 \text{ kW} & f_3 &= 4,8 \text{ kW} & f_5 &= 1,2 \text{ kW} \\ f_2 &= 3,2 \text{ kW} & f_4 &= 0 \text{ kW} & f_6 &= 0,7 \text{ kW} \end{aligned}$$

(d) Aplicação do Método GRF



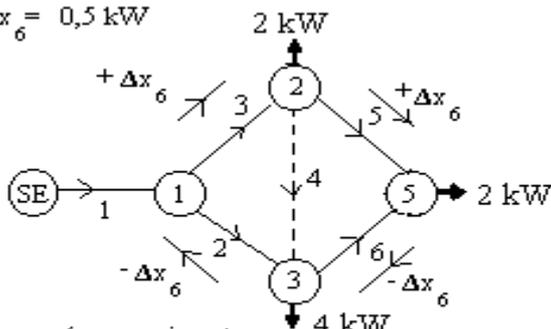
Fluxos ótimos

$$\begin{aligned} f_1 &= 8 \text{ kW} & f_3 &= 4,5 \text{ kW} & f_5 &= 1,5 \text{ kW} \\ f_2 &= 3,5 \text{ kW} & f_4 &= 0 \text{ kW} & f_6 &= 0,5 \text{ kW} \end{aligned}$$

Figura 4.6: (c) Otimalidade dos fluxos em árvores: aplicação do conceito de movimentação de fluxos no ciclo, ao abrir-se o arco 4 e (d) obtenção da nova distribuição ótima de fluxos

Na Figura 4.7(e) também podem ser observados os novos valores dos fluxos ao se dissolver o ciclo. A nova distribuição ótima de fluxos, após a aplicação do método do gradiente reduzido para fluxos em redes, pode ser observada na Figura 4.7(f).

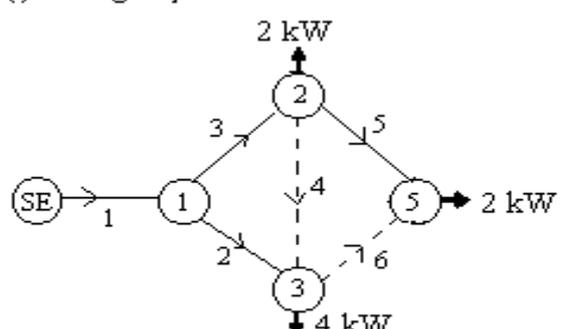
(e) Movimentação dos fluxos no ciclo :
 $\Delta x_6 = 0,5 \text{ kW}$



Fluxos após o movimento

$$\begin{aligned} f_1 &= 8 \text{ kW} & f_3 &= 5 \text{ kW} & f_5 &= 2 \text{ kW} \\ f_2 &= 3 \text{ kW} & f_4 &= 0 \text{ kW} & f_6 &= 0 \text{ kW} \end{aligned}$$

(f) Configuração Radial Final



Fluxos ótimos

$$\begin{aligned} f_1 &= 8 \text{ kW} & f_3 &= 4 \text{ kW} & f_5 &= 2 \text{ kW} \\ f_2 &= 4 \text{ kW} & f_4 &= 0 \text{ kW} & f_6 &= 0 \text{ kW} \end{aligned}$$

Figura 4.7: (e) Otimalidade dos fluxos em árvores: aplicação do conceito de movimentação de fluxos no ciclo, ao abrir-se o arco 6 e (f) obtenção da nova distribuição ótima de fluxos

Como não há mais ciclos a serem desfeitos na rede, o método da busca heurística modular pára com a configuração radial final obtida como na Figura 4.7(f) cujo valor final de perdas vale 0,175 W. Esta solução mostra que a configuração inicial é a melhor configuração para esta rede.

Podemos caracterizar o procedimento de preparação do problema relaxado $(\mathcal{P}_1)_r$ para estados sucessores pela seguinte sequência de passos:

Passo 0 Verifique se o arco a_k , pertencente ao ciclo a ser desfeito e que deverá ser aberto, pertence ao conjunto das variáveis dependentes. Se sim, encontre um arco a_l pertencente ao ciclo que faça parte do conjunto das variáveis independentes. Se não, vá para o *Passo 2*.

Passo 1 Substitua o arco a_k pelo arco a_l encontrado, realizando uma troca de base.

Passo 2 Tome como valor de atualização (Δx_{a_k}) o valor do fluxo no arco a_k . Atualize os fluxos no ciclo. Para isso, circule o valor Δx_{a_k} no ciclo no sentido contrário ao da direção do fluxo do arco a ser aberto. Aos arcos pertencentes ao ciclo que possuem a mesma direção do arco a_k , seus fluxos são acrescidos de $-\Delta x_{a_k}$. Aos que possuem direção oposta ao arco a_k , seus fluxos são acrescidos de $+\Delta x_{a_k}$.

Passo 3 Marque o arco a_k ser aberto, para que no problema sucessor este seja considerado em situação de otimalidade. A marca é usada também para evitar a reintrodução do mesmo na base em estados sucessores a este.

4.2.3 Resultados de Comparação entre as Duas Abordagens

A seguir são apresentados alguns resultados obtidos que ilustram a comparação entre o procedimento penalizador utilizado por Cavellucci e Lyra (1997) e o procedimento de ampliação das condições de otimalidade dos fluxos, apresentado neste trabalho, ambos para preparação de problemas relaxados $(\mathcal{P}_1)_r$ para estados sucessores.

Foram utilizadas 6 redes para esta comparação: a rede denominada Wu (Baran and Wu, 1989a), a rede teste denominada Cavel (Cavellucci, 1998) e 4 redes teste reais, cujos dados foram gentilmente cedidos pela CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz). A Tabela 4.2 apresenta as características de cada uma das redes.

Tabela 4.2: Características das redes utilizadas nos testes de comparação entre o procedimento de penalização e o procedimento de ampliação das condições de otimalidade dos fluxos

Rede	No. de nós	No. de arcos	No. de ciclos	Base (V)	Carreg. (kW)	Perdas Iniciais (kW)
Cavel	47	48	4	13800	22000,00	2,52
Wu	33	37	5	12600	3715,00	131,54
A	1528	1558	6	11900	19612,00	458,20
B	2274	2316	21	11400	59433,00	1765,56
C	6860	7063	59	13200	128037,78	2277,44
D	5994	6363	112	13200	260466,46	3234,87

Os resultados obtidos com a aplicação do método da busca heurística modular com parâmetro de ramificação $p = 1$ são apresentados na Tabela 4.3. Para a obtenção destes resultados, utilizou-se uma máquina *AMD-K6-II* com 300 Mhz e 64Mb de memória *RAM*. Os programas foram codificados em linguagem C++ e foi utilizado o compilador *C++ Builder 5.0 of Borland*. As colunas da Tabela 4.3 são definidas por:

coluna 1 - a rede a ser testada;

coluna 2 - o valor da solução de perdas, em kW, associada à configuração final obtida utilizando-se o método da busca heurística modular com o procedimento penalizador para a preparação do problema relaxado $(\mathcal{P}_1)_r$ para estados sucessores, para cada rede;

coluna 3 - os tempos computacionais de execução gastos (hh:mm:ss) para a obtenção das soluções na coluna 2, para cada rede;

- coluna 4* - o percentual de redução de perdas obtida em relação as perdas associadas às configurações iniciais, para cada rede;
- coluna 5* - o valor da solução de perdas, em kW, associada à configuração final obtida utilizando-se o método da busca heurística modular com o procedimento de ampliação das condições de otimalidade dos fluxos para a preparação do problema relaxado $(\mathcal{P}_1)_r$ para estados sucessores, para cada rede;
- coluna 6* - os tempos computacionais de execução gastos (mm:ss) para a obtenção das soluções na coluna 5, para cada rede;
- coluna 7* - o percentual de redução de perdas obtida em relação as perdas associadas às configurações iniciais, para cada rede.

Tabela 4.3: Comparação dos resultados obtidos com a aplicação do procedimento penalizador e o procedimento de movimentação por ampliação das condições de otimalidade dos fluxos

Rede	Perdas Finais por Penaliz. (kW)	Tempos obtidos (hh:mm:ss)	Redução obtida (%)	Perdas Finais por Moviment. (kW)	Tempos obtidos (mm:ss)	Redução obtida (%)
Cavel	2,12	0,01	15,87	2,12	0,01	15,87
Wu	84,07	0,01	36,08	84,07	0,01	36,08
A	402,38	14,45	12,18	402,38	2,11	12,18
B	1765,56	13:25,81	0,00	1675,82	22,64	5,08
C	2193,91	3:52:02,30	3,67	2113,98	3:14,84	7,18
D	3234,87	5:16:54,81	0,00	3126,81	22:51,71	3,34

Podemos observar pelos resultados obtidos na Tabela 4.3 que para os testes com as redes Wu, Cavel e A os dois procedimentos obtiveram as mesmas reduções de perdas, porém o procedimento de movimento de fluxos no ciclo obteve menores tempos computacionais de execução.

Para o teste com a rede C o procedimento de penalização obteve porcentagem de redução de perdas de 3,67%. No entanto, este valor foi menor do que a porcentagem de redução de perdas obtida pelo procedimento de ampliação das condições de otimalidade dos fluxos (7,18%) e com um tempo computacional de execução maior. A Tabela 4.4 apresenta as manobras que devem ser realizadas com cada um dos procedimentos utilizados para o teste com a rede C. As chaves destacadas em negrito são aquelas que aparecem na solução em apenas um dos procedimentos. As soluções encontradas para a rede C, apresentadas na Tabela 4.4, são diferentes, conseqüentemente, correspondem a reduções de perdas diferentes.

Tabela 4.4: Comparação entre as manobras a serem realizadas para a obtenção das configurações finais associada as reduções de perdas obtidas na Tabela 4.3 para a Rede C

Rede C	Chaves a serem Abertas	Chaves a serem Fechadas
BHM (p=1) com procedimento de penalização	5491,5521,6493,5597,6479,6487,5606,5926, 5665 ,5686,5692,6260,6205,6210,6197,5720,6229, 5731 ,6182,6136,6104,6071	5469,6511,5580,6476,6473,5984,5964,5938,5911,5757,5888,5684,6200,5718,6253,6212,5770,6245,6215,6168,6108, 6087
BHM (p=1) com procedimento de ampliação das condições de otimalidade dos fluxos	5491,5521,6493,5597,6479,6487, 5677 ,5606,5926,5686,5692,6260,6205,6210, 5693 ,6197,5720,6229,6182,6136,6104,6071	5469,6511,5580,6476,6473,5984,5964,5938,5911,5757,5888,5684,6200,5718,6253,6212,5770,6245,6215, 5744 ,6168,6108

Para os testes com as redes B e D, o procedimento de penalização falhou. Este não conseguiu obter uma configuração radial final cuja solução de menores perdas associada fosse menor do que a solução de perdas associada à configuração inicial. Isto nos faz concluir que o procedimento de penalização se mostra instável ao aplicá-lo em problemas de redução de perdas com redes reais. Este comportamento, no entanto, não é observado pelo procedimento de ampliação das condições de otimalidade dos fluxos. Para estas mesmas redes, este procedimento obteve configurações radiais finais cujas soluções de menores perdas associadas possuem reduções de 5,08% e 3,34%, respectivamente.

Na próxima seção serão detalhados os procedimentos necessários para adequar os métodos desenvolvidos no Capítulo 3 para aplicação em redes reais.

4.3 Procedimentos de Otimização para Redes com Arcos de Diferentes Categorias

4.3.1 Classificação do Conjunto de Arcos

No Capítulo 2 foram apresentados os principais componentes usados para a representação das redes de distribuição de energia elétrica, onde definiram-se os conjuntos \mathcal{N} de nós e \mathcal{A} de arcos. Para a resolução do problema envolvendo redes reais teremos que ser mais específicos em relação as entidades pertencentes ao conjunto \mathcal{A} de arcos.

Iremos dividir o conjunto \mathcal{A} de arcos em um conjunto com 2 tipos de elementos: chaves e trechos de redes. Iremos definir como estado inicial de um arco o estado aberto ou fechado que o arco apresenta na configuração radial inicial dada. A alteração no estado de um arco significa que este passou da condição de aberto para a condição de fechado ou vice-versa.

Os elementos tipo chave são arcos que possuem característica de manobra, ou seja, poderão ter seus estados iniciais alterados. Os elementos tipo trecho são arcos que não poderão ser manobrados, ou seja, não poderão sofrer alterações de estado inicial durante a busca por uma configuração de menores perdas.

Além da divisão do conjunto \mathcal{A} de arcos iremos especificar os elementos tipo chave em três diferentes componentes. São eles:

- chaves à óleo,
- chaves faca e
- chaves fusível.

Apenas estes tipos de arcos poderão ter a opção de manobra (ou seja, podem ser abertos ou fechados) durante o processo de busca. Quaisquer outros arcos diferentes destes, presentes nas redes a serem testadas, serão classificados como elementos não manobráveis. Estes arcos não poderão ter seu estado inicial alterado em momento algum durante o processo de busca.

Para se realizar diferentes estudos basta especificar quais tipos de chaves podem ser manobradas. Pode-se realizar estudos com manobra de um único um tipo de chave, combinar chaves aos pares, ou ainda manobrar todos tipos de chaves.

Estas especificações foram desenvolvidas para adequar os algoritmos de reconfigurações de redes, apresentados no Capítulo 3. A seguir serão apresentados os detalhes das especializações para os métodos desenvolvidos.

4.3.2 Distinção entre Arcos e Chaves na Busca Heurística Modular

As particularidades mencionadas na seção anterior levam a modificações nos *Passos 1 e 3* da busca heurística modular (Seção 3.3). Isto significa que a montagem da lista ABERTO (Seção 3.3), o método do gradiente reduzido para fluxos em redes (Seção 4.1.1) e o procedimento de preparação do problema relaxado $(\mathcal{P}_1)_r$ para estados sucessores (Seção 4.2) devem ser alterados.

Dissolução de Ciclos

A lista ABERTO, que contém a sequência de arcos em ordem decrescente dos valores de fluxo (*Passo 1* da busca heurística modular), deve conter apenas os arcos que correspondem a chaves com condição de manobra em ordem decrescente dos valores dos fluxos. Deve-se notar que esta lista poderá conter chaves (com condição de manobra) correspondentes a variáveis básicas ou não básicas.

O Método do Gradiente Reduzido para Fluxos em Redes Reais

A adequação do método do gradiente reduzido, apresentado na Seção 4.1.1, envolve apenas o *Passo 6*. A alteração a ser feita está relacionada à escolha das variáveis que poderão entrar e sair da base. Antes, porém, são necessárias algumas definições:

Definição 4.3.1 Uma árvore \mathcal{G}' é separada em duas sub-árvores quando um arco $a_i \in \mathcal{G}'$ é retirado da mesma. Define-se por co-ciclo associado ao arco a_i e à árvore \mathcal{G}' , ao conjunto de arcos apoiados nas duas sub-árvores (Ahuja et al., 1993).

Propriedade 4.3.1 Uma variável independente a_i pode substituir uma variável dependente a_k se o arco a_i correspondente pertencer ao co-ciclo (associado ao arco a_i) e se seu fluxo estiver totalmente imerso no seu intervalo de factibilidade (Ahuja et al., 1993).

A Figura 4.8(a) apresenta uma rede de 4 nós e 5 arcos e uma árvore \mathcal{G}' associada à rede. A Figura 4.8(b) ilustra as duas sub-árvores criadas, ao retirar-se o arco 3 da árvore \mathcal{G}' : a sub-árvore 1 (formada pelos nós 1 e 2) e a sub-árvore 2 (formada pelos nós 3 e 4). A Figura 4.8(c) ilustra o co-ciclo (conjunto formado pelos arcos 2 e 4) associado ao arco 3 e à árvore \mathcal{G}' .

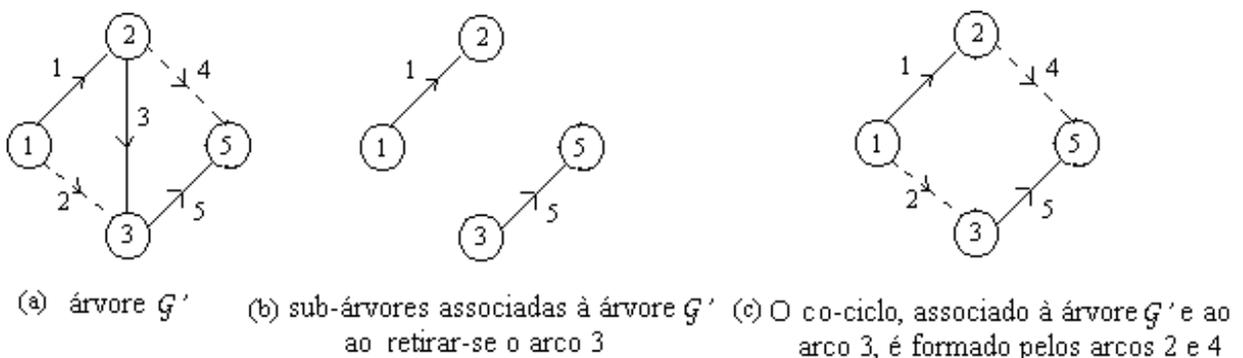


Figura 4.8: Sub-árvores e co-ciclo associado ao arco 3 e à árvore \mathcal{G}'

Escolha da Variável para Entrar na Base

Suponha que o conjunto de variáveis independentes (partição J) já tenha sido criado. Suponha que no *Passo 6* um arco a_k , correspondente a uma variável dependente, alcançou um dos seus limites. É necessário então realizar uma troca de base.

Um arco a_l correspondente a uma variável independente pode substituir o arco a_k , correspondente a uma variável dependente com fluxo saturado, se for uma chave pertencente ao conjunto J e se possuir condição de manobra. Além disso, a chave a_l deve pertencer ao co-ciclo associado ao arco a_k , ao ser introduzido na árvore. Dentre os candidatos que satisfazem estas condições, escolhe-se aquele com condição de não-degenerescência, ou seja, aquele possuir fluxo totalmente imerso em seu intervalo de factibilidade.

Como ilustração, iremos utilizar uma rede real de 9 nós e 13 arcos apresentada na Figura 4.9. Suponha que nesta Figura as chaves 3, 4, 5, 7, 8, 9 e 10 são do tipo à óleo, as chaves 1, 11 e 13 são do tipo faca, as chaves 6 e 12 são do tipo fusível e o arco 2 seja uma linha elétrica. As demandas, os valores iniciais de fluxos e o carregamento serão desconsiderados neste exemplo, para simplificação. Suponha, para este exemplo, que possam ser manobradas apenas as chaves à óleo.

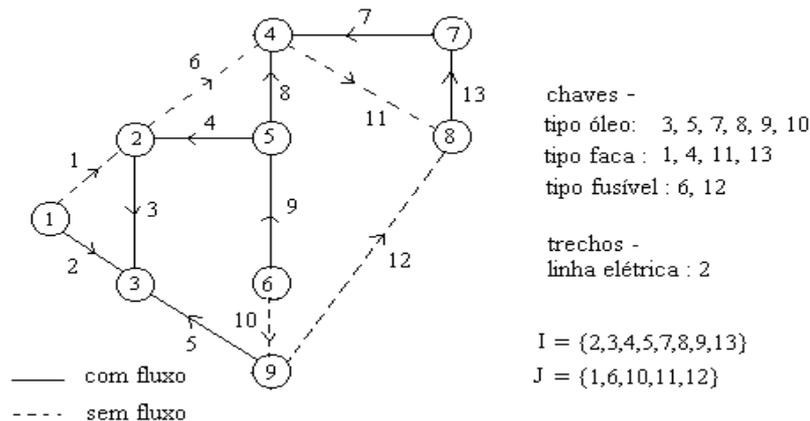


Figura 4.9: Árvore \mathcal{G}' associada a configuração inicial de uma rede real. Condição de manobra: apenas chaves à óleo

Para ilustrar a realização de uma troca de base, suponha que a chave 4 seja a variável escolhida para sair da base, por ter alcançado um dos seus limites. Suponha que o conjunto de variáveis não básicas atual, $J = \{1, 6, 10, 11, 12\}$, possua condição de não-degenerescência. Ao “retirar-se” a chave 4, separamos a árvore associada à rede real em duas sub-árvores básicas, como apresentado na Figura 4.10(a).

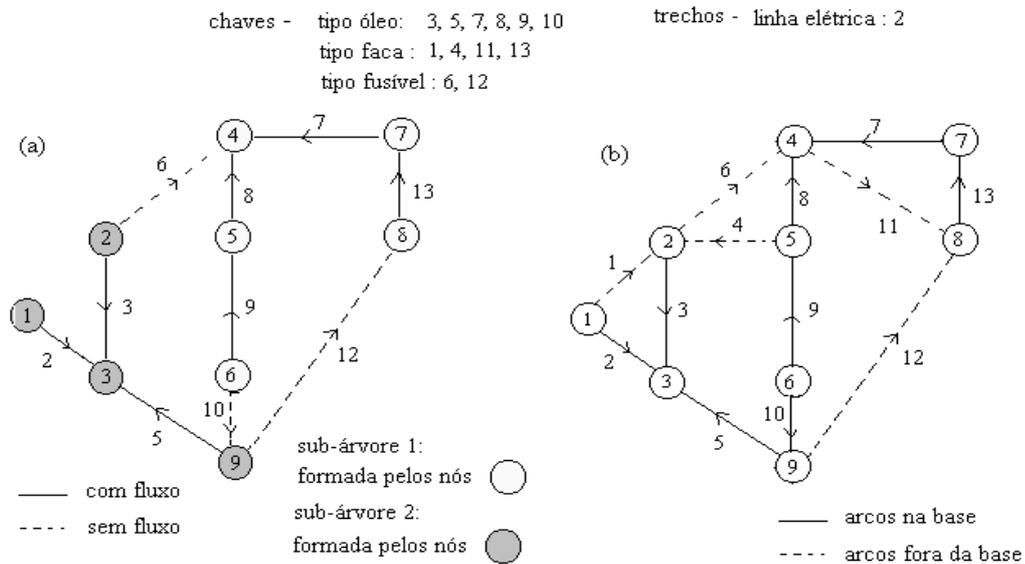


Figura 4.10: (a) Sub-árvores associadas a árvore \mathcal{G}' da Figura 4.9, criadas a partir da retirada da chave 4 e (b) ilustração de troca de base: saída da chave 4 (por saturação) e entrada da chave 10

As variáveis independentes candidatas a substituir a chave 4, cujos índices pertencem ao co-ciclo associado a chave 4 e a árvore \mathcal{G}' da Figura 4.9, são as chaves 6, 10 e 12 (Figura 4.10(a)). Falta verificar quais, dentre estas, possuem condição de manobra. Neste caso, somente a chave 10 é manobrável. Assim, efetuando a troca de base (saída da chave 4 e entrada da chave 10) teremos os novos conjuntos definidos por: $J = \{1, 4, 6, 11, 12\}$ e $I = \{2, 3, 5, 7, 8, 9, 10, 13\}$. A nova configuração da rede é representada pela Figura 4.10(b).

Para garantir que o método do gradiente reduzido para fluxos esteja adequado para aplicação em redes reais, basta alterar o *Passo 6* no algoritmo apresentado na Seção 4.1.1:

Passo 6 Se $\alpha_3 < \alpha_1$, volte para o *Passo 0*. Caso contrário, procure uma chave aberta com condição de manobra a_c cujo fluxo satisfaça a condição $\underline{x}_c < x_c < \bar{x}_c$ e que forme uma nova árvore geradora quando substituir a chave fechada que sairá da árvore atual, a_l , por seu fluxo ter atingido um de seus limitantes; atualize a partição (I, J) ,

$$I \leftarrow I - \{l\} + \{c\} \text{ e } J \leftarrow J - \{c\} + \{l\}$$

e volte para o *Passo 0*.

As especificações sobre o conjunto \mathcal{A} de arcos apresentadas devem ser aplicadas à preparação do problema relaxado $(\mathcal{P}_1)_r$ para estados sucessores. É o que será apresentado na próxima seção.

4.3.3 Distinção entre Arcos e Chaves na Preparação do Problema Relaxado $(\mathcal{P}_1)_r$ para Estados Sucessores

Como se está interessado em abrir arcos que sejam chaves manobráveis e que correspondam a variáveis independentes, deve-se verificar a qual conjunto (I ou J) a variável que está no topo da lista ABERTO pertence, para a preparação o problema relaxado $(\mathcal{P}_1)_r$ para estados sucessores.

Se a chave manobrável a_k selecionada corresponder a uma variável dependente, deve-se procurar na lista ABERTO uma chave manobrável a_l , correspondente a uma variável independente. Se for encontrada uma chave manobrável nestas condições, realiza-se uma troca de base (saída de a_k e entrada de a_l).

Se a lista ABERTO contiver apenas chaves manobráveis correspondentes a variáveis dependentes (não havendo a possibilidade de troca de base), então o ciclo atual não poderá ser

por possuir o menor fluxo. No entanto, esta chave corresponde a uma variável básica. Para se realizar a troca de base, antes da abertura do ciclo, tem-se como opção a chave 10 (neste caso, única variável independente manobrável pertencente à lista ABERTO). Ao realizar-se a troca de base teremos os conjuntos $I = \{2, 3, 4, 5, 7, 8, 10, 13\}$ e $J = \{1, 6, 9, 11, 12\}$.

Marca-se a variável não básica 9, para que a mesma não faça parte da lista ABERTO e permaneça com fluxo zero, caso pertença a algum outro ciclo (Seção 4.2.2). Realiza-se a atualização de fluxos no ciclo (Seção 4.2.2) e a rede possui configuração final como apresentada na Figura 4.11(b).

Para garantir que o método de preparação do problema relaxado $(\mathcal{P}_1)_r$ para estados sucessores esteja adequado para a aplicação em redes reais, basta alterar os *Passos 0* e *1* no algoritmo apresentado na Seção 4.2.2.

Passo 0 Verifique se a chave a_k pertencente ao ciclo a ser desfeito e que deverá ser aberto, possui condição de manobra e pertence ao conjunto das variáveis dependentes. Em caso afirmativo, encontre uma chave a_l com condição de manobra também pertencente ao ciclo, que faça parte do conjunto das variáveis independentes. Caso contrário, vá para o *Passo 2*.

Passo 1 Realize uma troca de base substituindo a chave a_k com condição de manobra pela chave a_l com condição de manobra encontrada.

Para verificar a possibilidade de uma redução adicional de perdas, a partir de uma busca local em torno da melhor configuração obtida ao final da aplicação do método da busca heurística modular, aplica-se o método do ajuste fino por troca de ramos (Seção 3.4). Na próxima seção serão apresentados os passos da adequação do método de troca de ramos para a aplicação em redes reais utilizando os conceitos introduzidos na Seção 4.3.

4.3.4 Distinção entre Arcos e Chaves no Ajuste Fino por Troca de Ramos

No Capítulo 3 foi introduzido o método do ajuste fino por troca de ramos que realiza uma busca local na melhor solução de perdas encontrada pelo método da busca heurística modular (considerando também as perdas reativas no problema (\mathcal{P}_1)). Para redes reais, deve-se rever este método e introduzir os conceitos de distinção entre trechos de rede e chaves manobráveis e não manobráveis, apresentados na Seção 4.3.

Ao encontrar a melhor solução radial para o problema de redução de perdas através da busca heurística modular, o método cria uma lista contendo todos os arcos abertos que apresentam uma diferença de tensão entre seus terminais (*Passo 1*, Seção 3.4). Para o problema de redução de perdas em redes reais esta lista de arcos abertos deverá conter apenas aqueles que sejam chaves, que estejam abertas, e que possuam condição de manobra, além da condição de diferença de tensão entre seus terminais.

Para cada chave (m) pertencente a lista de chaves abertas, deve-se percorrer o ciclo formado pelo fechamento dessa chave (a partir do terminal de maior diferença de potencial) e procurar uma outra chave com condição de manobra (b), cuja abertura irá proporcionar a maior redução de perdas. Ao encontrar a chave (b) nestas condições, realiza-se o fechamento de m e abertura de b .

Como exemplo, suponha que a configuração da rede radial obtida ao final da aplicação do método da busca heurística modular seja a representada na Figura 4.12(a) e que as chaves pertencentes a esta rede possuam as mesmas condições de manobra como apresentada na Figura 4.9.

A lista de arcos abertos deve conter as chaves abertas que possuem condição de manobra: neste caso, a lista é formada pela chave 3. Suponha que esta chave possua diferença de tensão entre seus terminais. Ao fecharmos a chave 3, verificamos um ciclo formado pelas chaves 10, 9, 4, 3 e 5. Neste caso, as chaves fechadas com condição de manobra, cuja abertura poderá proporcionar reduções de perdas serão as chaves 5, 9 e 10.

Após calculados os valores respectivos de redução de perdas ΔP_{bm} (3.3) para cada par

de chaves ($3 \leftrightarrow 9$, $3 \leftrightarrow 5$ e $3 \leftrightarrow 10$), deverá ser escolhido qual par apresentou maior redução de perdas (maior valor de ΔP_{bm}).

Suponha que tenha sido o par de chaves 3 e 5 a proporcionar a maior redução de perdas. Abrindo-se a chave 5 e fechando-se a chave 3, a rede radial final poderá ser representada pela Figura 4.12(b).

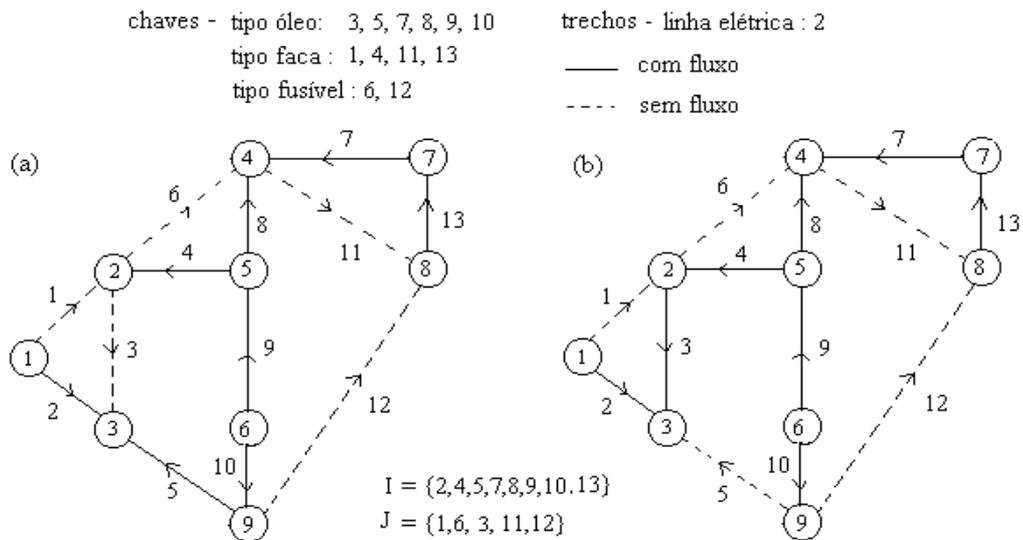


Figura 4.12: (a) Rede radial obtida pela aplicação da BHM na rede representada pela Figura 4.9 e (b) ajuste fino por troca de ramos aplicado à rede radial apresentada em (a)

Para garantir que o método do ajuste fino por troca de ramos esteja adequado para redes com trechos e chaves basta alterar o *Passo 1* no algoritmo apresentado na Seção 3.4:

Passo 1 Para cada chave aberta com condição de manobra (chave b) que apresentar uma diferença de tensão significativa entre seus terminais, fazer:

Fechar essa chave e identificar o ciclo formado na rede;

Percorrer o ciclo, a partir do terminal de maior diferença de potencial, e encontrar a chave fechada com condição de manobra (chave m) cuja abertura proporcionará a maior redução de perdas (ΔP_{bm});

Se não existirem chaves manobráveis com quedas de tensão significativas entre seus terminais, pare — o processo de troca de chaves está concluído. Caso contrário, vá para o *Passo 2*.

O próximo capítulo apresenta os resultados obtidos ao se aplicar os métodos desenvolvidos nos Capítulos 3 e 4 em redes reais de dimensão grande. Serão comparados os resultados obtidos com os métodos “abertura sequencial de chaves” e “troca de ramos” aplicadas separadamente. Esses conjuntos de resultados serão comparados com a abordagem integrada, proposta neste trabalho.

Capítulo 5

Estudos de Casos I

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com a aplicação em redes reais de dimensão grande do método da Busca Heurística Modular (BHM), do método do Ajuste Fino por Troca de Ramos (AFTR) e do método de duas fases que resulta da aplicação da BHM seguida da aplicação do AFTR. Estes três métodos serão aplicados a três conjuntos de testes de redes reais de dimensão grande, que diferem entre si pelo tipo de chave que poderá ser manobrada. Antes de apresentar os resultados, serão apresentadas as características das redes testadas. É útil ressaltar que as perdas a que se referem os estudos de casos são as perdas técnicas.

5.1 Características das Redes Reais para Testes

As 11 redes reais e de grande porte disponíveis para a realização dos testes neste trabalho possui dados que foram gentilmente cedidos pela CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz de Campinas).

Cada uma dessas redes representa um sistema de distribuição de energia elétrica completo e possui características que são apresentadas nas Tabelas 5.1 e 5.2. Neste trabalho, iremos denominá-las A, B, C, D, E, F, G, H, I, J e K.

As perdas iniciais mencionadas na coluna 7 da Tabela 5.1 são normalmente perdas associadas a uma configuração de poucas perdas obtida por procedimentos de simulação.

Tabela 5.1: Características das redes disponíveis para testes

Rede	No. de nós	No. de arcos	No. de alim.	Base (V)	Carreg. (kW)	Perdas Iniciais (kW)
A	423	435	1	11900	10325,00	163,40
B	646	655	1	13200	11388,00	368,78
C	1528	1558	3	11900	19612,00	458,20
D	1597	1644	2	13800	30358,99	442,34
E	2449	2490	3	11400	42383,96	1011,16
F	2274	2316	3	11400	59433,00	1765,56
G	6066	6269	11	11400	152081,73	1734,58
H	6097	6332	11	11400	166154,58	2862,95
I	5994	6363	2	13200	260466,46	3234,87
J	6558	6826	14	11400	185190,37	2124,28
K	6860	7063	6	13200	128037,78	2277,44

Tabela 5.2: Número de arcos do tipo chave nas redes disponíveis para testes

Rede	No. de chaves à óleo	No. de chaves faca	No. de chaves fusível	No. de chaves à óleo abertas	No. de chaves faca abertas	No. de chaves fusível abertas
A	7	11	62	2	0	1
B	4	29	103	2	2	2
C	19	42	184	7	3	20
D	29	57	214	13	8	26
E	48	60	339	21	6	15
F	50	55	293	21	9	13
G	159	213	551	73	22	108
H	159	213	551	73	22	108
I	201	622	348	112	187	71
J	182	246	624	95	43	131
K	136	159	833	59	20	120

É interessante observar que o grau de dificuldade da resolução do problema de redução de perdas está fortemente associado ao número total de chaves presentes nas redes estudadas

— essa característica é um indicador mais forte da dificuldade da resolução do problema do que o número total de arcos da rede. Também é interessante notar que o nível máximo de profundidade que a árvore de buscas poderá atingir depende do número total de chaves abertas, para cada uma das redes.

Os métodos desenvolvidos neste trabalho necessitam, além do arquivo de leitura de dados da rede de distribuição a ser testada, quais os tipos de chaves poderão ser manobradas, para análise de resultados. Como já mencionado, dependendo do estudo que se quer realizar, podem ser escolhidas uma chave por vez, ou combinações das mesmas.

5.2 Resultados Obtidos

Os testes desenvolvidos nesta seção visam comparar a redução de perdas obtida pela aplicação de três tipos de métodos:

- (1) apenas o método da busca heurística modular (BHM), com $p = 1$;
- (2) apenas o método do ajuste fino por troca de ramos (AFTR);
- (3) aplicação do método da busca heurística modular (BHM) com $p = 1$, seguido por uma busca local na melhor solução encontrada através da aplicação do método do ajuste fino por troca de ramos (AFTR).

O método da busca heurística modular com parâmetro $p = 1$ (opção (1)) caracteriza o procedimento de abertura sequencial de chaves, desenvolvido por (Merlin and Back, 1975), aqui aplicado a redes reais de dimensão grande.

O método do ajuste fino por troca de ramos (opção (2)) caracteriza o procedimento de troca de ramos desenvolvido por Civanalar et al. (1988), utilizando o algoritmo desenvolvido por Baran e Wu (1989a), que considera os fluxos de potência reativa.

Os resultados obtidos com a aplicação dos métodos nas redes especificadas nas Tabelas 5.1 e 5.2 são apresentados nas Tabelas 5.3, 5.7 e 5.9. As colunas são definidas por:

coluna 1 - a rede e a opção do método a ser testada;

coluna 2 - o valor da redução de perdas em relação as perdas na configuração inicial, obtida ao final da aplicação do método da busca heurística modular, em kW (isenção de valor indica a não aplicação do mesmo);

coluna 3 - o valor da redução de perdas em relação as perdas na configuração inicial, obtida ao final da aplicação do método do ajuste fino por troca de ramos, em kW (isenção de valor indica a não aplicação do mesmo);

coluna 4 - o percentual de redução de perdas obtida em relação as perdas nas configurações iniciais associadas a cada rede e

coluna 5 - os tempos computacionais de execução gastos para a obtenção de cada opção (hh:mm:ss).

Como já mencionado no Capítulo 4, para a obtenção destes resultados utilizou-se uma máquina *AMD-K6-II* com 300 Mhz e 64Mb de memória *RAM*. Os programas foram codificados em linguagem C++ e foi utilizado o compilador *C++ Builder 5.0 of Borland*.

É útil destacar que foram utilizados os conceitos de aplicação seletiva do método do gradiente reduzido, a serem detalhados no Capítulo 6, ao aplicar-se a busca heurística modular com $p = 1$ requerida nas opções (1) e (3).

O primeiro conjunto de testes envolve a aplicação de cada uma das três abordagens (opção (1), (2) e (3)) em cada uma das redes especificadas nas Tabelas 5.1 e 5.2, com a opção de manobra de chaves à óleo. Os resultados são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Resultados obtidos para o 1º conjunto de testes

Rede (Opção)	Perdas c/ BHM (kW)	Perdas c/ AFTR (kW)	Redução Total (%)	Tempos (mm:ss)
A				
(1)	163,40		0,00	0,03
(2)		163,40	0,00	0,04
(3)	163,40	163,40	0,00	0,04
B				
(1)	368,78		0,00	0,03
(2)		368,78	0,00	0,05
(3)	368,78	368,78	0,00	0,05
C				
(1)	402,38		12,18	1,37
(2)		402,38	12,18	1,11
(3)	402,38	402,38	12,18	1,43
D				
(1)	413,30		6,56	6,26
(2)		404,15	8,63	3,57
(3)	413,30	403,34	8,82	6,32
E				
(1)	966,16		4,45	31,03
(2)		979,61	3,12	19,99
(3)	966,16	948,48	6,20	31,14
F				
(1)	1675,82		5,08	11,57
(2)		1684,56	4,59	10,16
(3)	1675,82	1675,26	5,11	12,08
G				
(1)	1684,31		2,89	1:15,57
(2)		1723,01	0,67	41,68
(3)	1684,31	1657,47	4,45	1:15,90
H				
(1)	2854,97		0,27	39,05
(2)		2850,30	0,44	36,31
(3)	2854,97	2833,54	1,03	39,27
I				
(1)	3126,81		3,34	12:35,05
(2)		3114,77	3,71	7:38,35
(3)	3126,81	3052,42	5,64	12:35,93
J				
(1)	2124,28		0,00	3:23,02
(2)		2099,97	1,14	1:18,43
(3)	2124,28	2099,97	1,14	3:23,40
K				
(1)	2113,98		7,17	1:57,08
(2)		2091,29	8,17	1:11,95
(3)	2113,98	2078,45	8,74	1:59,30

Pode-se observar pelos resultados obtidos na Tabela 5.3 que todos os testes apresentaram redução de perdas, com exceção dos testes com as redes denominadas A e B. Em todos os outros casos tanto com a aplicação em separado de cada um dos métodos (opções (1) e (2)), quanto com o combinado dos dois (opção (3)), foram obtidas porcentagens finais de redução de perdas interessantes. Nestes casos as melhores porcentagens finais de perdas foram obtidas com a aplicação do método da busca heurística modular seguido da aplicação do método do ajuste fino por troca de ramos.

No caso das redes denominadas A e B, nenhum dos métodos conseguiu reduzir as perdas iniciais. Isto significa que não haviam opções de chaves à óleo que poderiam ser abertas para a dissolução dos ciclos, ou realizando a abertura dessas chaves, não houve redução de perdas. Por este motivo, o método permanece com a configuração inicial da rede. O mesmo aconteceu para o teste de aplicação do método da busca heurística modular, na rede denominada J.

Como exemplo, as Tabelas 5.4, 5.8 e 5.10 ilustram quais chaves deverão ser abertas e quais deverão ser fechadas em cada um dos testes utilizando a rede denominada E. Estas manobras garantem as reduções finais de perdas, nos casos em que ocorreram, apresentadas nas Tabelas 5.3, 5.7 e 5.9.

Tabela 5.4: Manobras a serem realizadas para a obtenção da configuração final associada à redução de perdas obtida na Tabela 5.3 - Rede E - 1^o conjunto de testes

Rede E (Opção)	Chaves a serem Abertas	Chaves a serem Fechadas
(1)	2015,1992,1972,1977,2043,2047,1825	1978,2020,1975,2010,2034,1843,1833
(2)	1992,1977,2047	1967,2010,1843
(3)	1992,1977,2047,1825	1967,2010,1843,1833

A Tabela 5.5 apresenta o teste envolvendo a aplicação da opção (3) na rede C, com parâmetro de ramificação $p = 19$ e manobra de chaves à óleo. Por considerar todas as possibilidades de abertura de chaves à óleo para a rede C, este teste caracteriza um exemplo de busca exaustiva.

Tabela 5.5: Resultados obtidos com a aplicação da busca heurística modular (com $p = 19$), seguida da aplicação do ajuste fino por troca de ramos - Rede C

Rede C (Opção)	Perdas c/ BHM (kW)	Perdas c/ AFTR (kW)	Redução Total (%)	Tempos (hh:mm:ss)
(3)	401,56	401,48	12,37	13:42:55,61

Tabela 5.6: Comparação entre as manobras a serem realizadas para a obtenção das configurações associadas às reduções de perdas obtidas nas Tabelas 5.3 e 5.5 - Rede C

Rede C Opção	Parâmetro	Chaves a serem Abertas	Chaves a serem Fechadas
(3)	p=1	1303, 1538	1533, 1540
(3)	p=19	1431, 1538	1540, 1311

Observando-se as Tabelas 5.3 e 5.5, para a rede C, pode-se perceber que o teste com a aplicação da busca heurística modular com $p = 19$ (caracterizando a busca exaustiva) encontrou uma redução de perdas melhor do que o teste com a aplicação da busca heurística modular com $p = 1$. No entanto, a melhoria na redução de perdas não atingiu 0,2 de ponto percentual, sendo necessário tempo computacional 780 vezes maior. Isto indica que, em testes com redes reais, a aplicação da busca heurística modular com $p = 1$ mantém a qualidade na redução de perdas, com baixos tempos computacionais.

O segundo conjunto de testes envolve a aplicação de cada um três métodos (opções (1), (2) e (3)) em cada uma das redes especificadas nas Tabelas 5.1 e 5.2, com a opção de manobra de chaves à óleo e chaves faca. Assim, pretende-se avaliar a redução final de perdas, uma vez que há uma opção maior de número de chaves que podem ser manobradas. Os resultados são apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Resultados obtidos para o 2º conjunto de testes

Rede (Opção)	Perdas c/ BHM (kW)	Perdas c/ AFTR (kW)	Redução Total (%)	Tempos (mm:ss)
A				
(1)	163,19		0,13	0,11
(2)		163,19	0,13	0,06
(3)	163,19	163,19	0,13	0,17
B				
(1)	368,78		0,00	0,17
(2)		368,78	0,00	0,00
(3)	368,78	368,78	0,00	0,17
C				
(1)	397,36		13,28	3,13
(2)		402,38	12,18	2,04
(3)	397,36	397,24	13,30	3,15
D				
(1)	412,81		6,68	13,67
(2)		394,22	10,88	8,74
(3)	412,81	385,91	12,76	13,78
E				
(1)	1011,16		0,00	1:04,59
(2)		962,99	4,76	44,49
(3)	1011,16	962,99	4,76	1:04,76
F				
(1)	1676,84		5,03	1:01,41
(2)		1683,86	4,63	51,96
(3)	1676,84	1650,83	6,50	1:01,52
G				
(1)	1560,99		10,01	1:21,89
(2)		1663,40	4,10	1:17,71
(3)	1560,99	1554,74	10,37	2:50,05
H				
(1)	2803,67		2,07	1:20,75
(2)		2817,47	1,59	48,56
(3)	2803,67	2778,21	2,96	1:21,29
I				
(1)	3003,76		7,14	19:27,00
(2)		2973,11	8,09	10:08,24
(3)	3003,76	2860,24	11,58	19:29,74
J				
(1)	2032,73		4,31	6:33,16
(2)		2060,35	3,01	2:14,09
(3)	2032,73	1994,03	6,13	6:33,93
K				
(1)	1973,82		13,33	3:08,45
(2)		2078,29	8,74	2:01,56
(3)	1973,82	1915,52	15,89	3:09,65

Pode-se observar pelos resultados obtidos na Tabela 5.7 que todos os testes apresentaram redução de perdas, com exceção dos testes com a rede denominada B. Em relação ao primeiro conjunto de testes, houve uma redução de perdas para a rede denominada A.

Assim como nos testes do primeiro conjunto, as melhores porcentagens finais de redução de perdas foram obtidas com a aplicação do método da busca heurística modular seguido da aplicação do método do ajuste fino por troca de ramos.

Em relação ao 1º conjunto de testes e pelo fato de haver a opção de manobra de mais um tipo de chave, algumas porcentagens finais de redução de perdas quase dobraram - como exemplo, as redes denominadas G, I e K. No caso da rede denominada J houve uma redução de 1,14% para o primeiro conjunto de testes e uma redução de até 6,13% para o segundo conjunto de testes. O mesmo não aconteceu com as opções (1) e (3) aplicadas à rede denominada E. Mesmo com a opção de mais um tipo de chave a ser manobrada, as porcentagens finais de redução de perdas ficaram abaixo, em relação as porcentagens finais de redução de perdas referente aos testes semelhantes envolvendo apenas manobra com chaves à óleo.

No caso do teste com a aplicação do método da busca heurística modular (1) na rede E, não houve redução alguma de perdas. Isto pode ser devido ao fato da lista ABERTO conter mais de um tipo de chave a ser manobrável. Por ter havido a opção de existirem chaves faça com menores valores de fluxo do que as chaves à óleo, os ciclos a serem desfeitos podem ter sido diferentes daqueles obtidos no 1º conjunto de testes (as árvores de buscas possuem caminhos diferentes). Assim, a configuração final obtida no 2º conjunto de testes para a rede E não obteve melhor redução de perdas do que sua configuração inicial. O mesmo aconteceu com o teste que envolve a aplicação da combinação dos métodos (3) na rede E. A árvore de busca obtida ao final da aplicação do método não obteve uma configuração radial final que gerasse uma redução de perdas melhor que o teste semelhante obtido na Tabela 5.3. Este teste se mostra interessante para a aplicação do conceito de ramificação contido no metaconhecimento a ser apresentado no Capítulo 6.

A Tabela 5.8 apresenta quais chaves deverão ser manobradas para cada um dos testes com a rede denominada E. Nas opções (2) e (3), as chaves 1997, 1965 e 1984 são chaves faca e as restantes são chaves à óleo.

Tabela 5.8: Manobras a serem realizadas para a obtenção da configuração final associada à redução de perdas obtida na Tabela 5.5 - Rede E - 2º conjunto de testes

Rede E (Opção)	Chaves a serem Abertas	Chaves a serem Fechadas
(1)	não há manobras	a serem realizadas
(2)	1997,1965,1977,2023,2047	1984,2002,1975,2010,1843
(3)	1997,1965,1977,2023,2047	1984,2002,1975,2010,1843

O terceiro conjunto de testes envolve a aplicação de cada um três métodos (opções (1), (2) e (3)) em cada uma das redes especificadas nas Tabelas 5.1 e 5.2, com a opção de manobra de chaves à óleo, chaves faca e chaves fusível. Este conjunto de testes visa avaliar a redução de perdas obtida quando pode-se manobrar todos os tipos de chaves disponíveis. Os resultados são apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9: Resultados obtidos para o 3º conjunto de testes

Rede (Opção)	Perdas c/ BHM (kW)	Perdas c/ AFTR (kW)	Redução Total (%)	Tempos (mm:ss)
A				
(1)	153,00		6,37	0,84
(2)		156,84	4,01	0,73
(3)	153,00	152,23	6,84	0,87
B				
(1)	332,46		9,85	1,04
(2)		367,35	0,39	0,88
(3)	332,46	332,46	9,85	1,09
C				
(1)	370,86		19,06	5,44
(2)		383,28	16,35	4,91
(3)	370,86	370,19	19,21	5,46
D				
(1)	413,24		6,58	26,36
(2)		388,74	12,12	17,52
(3)	413,24	376,24	14,94	26,52
E				
(1)	1011,16		0,00	3:14,93
(2)		958,93	5,17	3:30,97
(3)	1011,16	958,93	5,17	3:30,97
F				
(1)	1600,94		9,32	2:23,35
(2)		1667,20	5,57	2:02,21
(3)	1600,94	1552,74	12,05	2:23,57
G				
(1)	1529,09		11,85	5:04,73
(2)		1614,01	6,95	3:08,67
(3)	1529,09	1507,48	21,61	5:05,44
H				
(1)	2770,92		3,21	2:28,91
(2)		2768,06	3,31	1:46,89
(3)	2770,92	2733,16	4,53	2:29,28
I				
(1)	2862,60		11,51	24:47,44
(2)		2902,51	10,27	15:51,69
(3)	2862,60	2738,72	15,34	24:50,62
J				
(1)	1992,04		6,22	5:02,81
(2)		1996,21	6,03	3:17,62
(3)	1992,04	1941,47	8,61	5:04,85
K				
(1)	1914,22		15,95	9:44,25
(2)		2026,86	11,00	8:55,04
(3)	1914,22	1852,92	18,64	9:46,50

Pode-se observar pelos resultados obtidos na Tabela 5.9 que todos os testes apresentaram redução de perdas, com exceção do teste (1) com a rede denominada E. Em relação ao segundo conjunto de testes, houve uma redução de perdas para a rede denominada B. Isto se deu pelo fato de haverem mais opções de chaves a serem manobradas.

Assim como nos testes do primeiro e segundo conjuntos, as melhores porcentagens finais de redução de perdas foram obtidas com a aplicação do método da busca heurística modular seguido da aplicação do método do ajuste fino por troca de ramos, para todos os testes. Em alguns casos, pelo fato de haver a opção de mais um tipo de chave para manobra, as porcentagens de redução de perdas quase dobraram, em relação ao segundo conjunto de testes - como exemplo, as redes denominadas F e G. Com as redes denominadas A, B e C, que no segundo conjunto de testes obtiveram reduções finais de perdas de 0,13%, 0,00% e 13,30%, respectivamente, no terceiro conjunto de testes obtiveram reduções finais de perdas de até 6,84%, 9,85% e 19,21%, respectivamente.

Os tempos computacionais gastos para a obtenção das reduções de perdas, em todos os testes, permitem a utilização da metodologia em redes reais de sistemas de distribuição de energia elétrica.

A Tabela 5.10 apresenta quais chaves deverão ser manobradas para cada um dos testes com a rede denominada E. Nas opções (2) e (3) as chaves 2006, 2026, 2108, 1966, 2035, 2106 são chaves fusível, as chaves 1997, 1965, 1984 são chaves faca e as restantes são chaves à óleo.

Tabela 5.10: Manobras a serem realizadas para a obtenção da configuração final associada à redução de perdas obtida na Tabela 5.7 - Rede E - 3º conjunto de testes

E Opção	Chaves a serem Abertas	Chaves a serem Fechadas
(1)	não há manobras	a serem realizadas
(2)	2006,2026,2108,1965,1997,1977,2023,2047	1966,2035,2106,1984,1843,1975,2002,2010
(3)	2006,2026,2108,1965,1997,1977,2023,2047	1966,2035,2106,1984,1843,1975,2002,2010

Pode-se observar pelos resultados obtidos apresentados nas Tabelas 5.3, 5.7 e 5.9 que os tempos computacionais gastos com a execução do método do ajuste fino são muito baixos

se comparados aos tempos computacionais de execução da busca heurística modular para $p = 1$. Verificou-se que dentre as três opções de métodos aplicados, a abordagem que forneceu melhores porcentagens de redução de perdas foi a opção (3) - combinação do método da busca heurística modular seguido da aplicação do método do ajuste fino por troca de ramos. Isto nos mostra que esta abordagem torna-se a muito atraente como método de reconfiguração para redes reais de dimensão grande, em relação a aplicação separada de cada um dos métodos.

Os testes realizados no Capítulo 6 utilizarão apenas a aplicação da opção (3). Para simplificação, iremos chamar esta combinação de **Método Reconfigurador de Redes**.

O próximo capítulo apresenta melhorias que tornaram o método **Reconfigurador de Redes** mais rápido em termos de tempos computacionais de execução, sem perda da qualidade da solução final na redução de perdas. A reunião destes critérios será denominado “metaconhecimento”, aplicado ao problema de redução de perdas em redes reais de distribuição de energia elétrica.

Capítulo 6

O Método Reconfigurador de Redes e a Aplicação do Metaconhecimento

Os primeiros testes realizados aplicando-se o método Reconfigurador de Redes no conjunto de redes especificado nas Tabelas 5.1 e 5.2 forneceram boas porcentagens de redução de perdas. No entanto, a obtenção dessas porcentagens foi cara em termos de tempos computacionais de execução. Isto motivou o desenvolvimento do conjunto de conceitos adicionais que podem ser caracterizados como “metaconhecimento”. Esses conceitos são apresentados neste capítulo.

As melhorias a serem apresentadas neste capítulo, que juntas formam o denominado “metaconhecimento”, foram baseados numa investigação das características do problema de redução de perdas para as redes de distribuição de energia elétrica especificadas nas Tabelas 5.1 e 5.2. Além de garantirem qualidade nas reduções de perdas, garantiram também tempos computacionais de execução mais baixos para a obtenção das mesmas, fazendo com que o Reconfigurador de Redes seja mais rápido.

Este “metaconhecimento” está baseado no estudo envolvendo dois conjuntos de critérios: o primeiro, a ser apresentado na Seção 6.1, é denominado de aplicação seletiva do método do gradiente reduzido para fluxos em redes. O segundo conjunto de critérios, a ser apresentado

nas Seções 6.2 e 6.3, utiliza a variação do parâmetro de ramificações conjuntamente com um estudo da função de estimativa $h(n)$, ambos necessários no método da busca heurística modular.

6.1 Aplicação Seletiva do Método do Gradiente Reduzido para Fluxos em Redes

O critério a ser apresentado nesta seção avalia a possibilidade de se aplicar seletivamente o método do gradiente reduzido para fluxos em redes.

A aplicação seletiva foi desenvolvida analisando-se o comportamento das curvas de crescimento obtidas pelos resultados apresentados nas Tabelas 5.3, 5.7 e 5.9 para as redes C, F, I e K. Estas curvas apresentam as variações de perdas em cada nível e estão representadas por linhas pontilhadas (linhas mais finas) nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3. Refletem o comportamento das soluções quando se aplica o método do gradiente reduzido refinado em todos os nós de exploração: são as chamadas soluções sem envenenamento. As curvas sólidas apresentam o comportamento das soluções quando se aplica os conceitos desenvolvidos nesta seção: são as chamadas soluções com envenenamento.

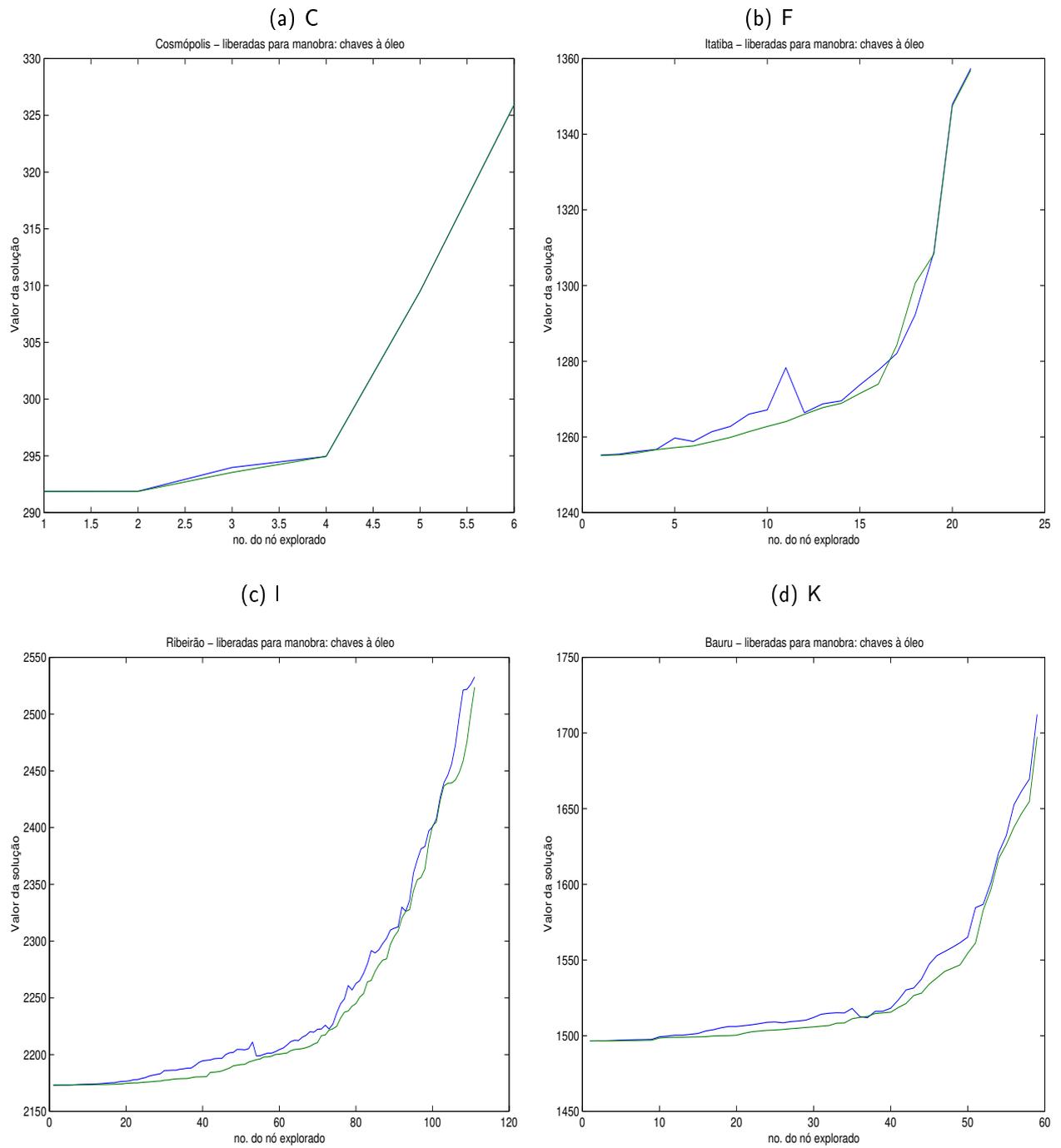


Figura 6.1: Comportamento das soluções em cada nível: curvas pontilhadas - soluções sem envenenamento; curvas sólidas - soluções com envenenamento. 1º conjunto de testes

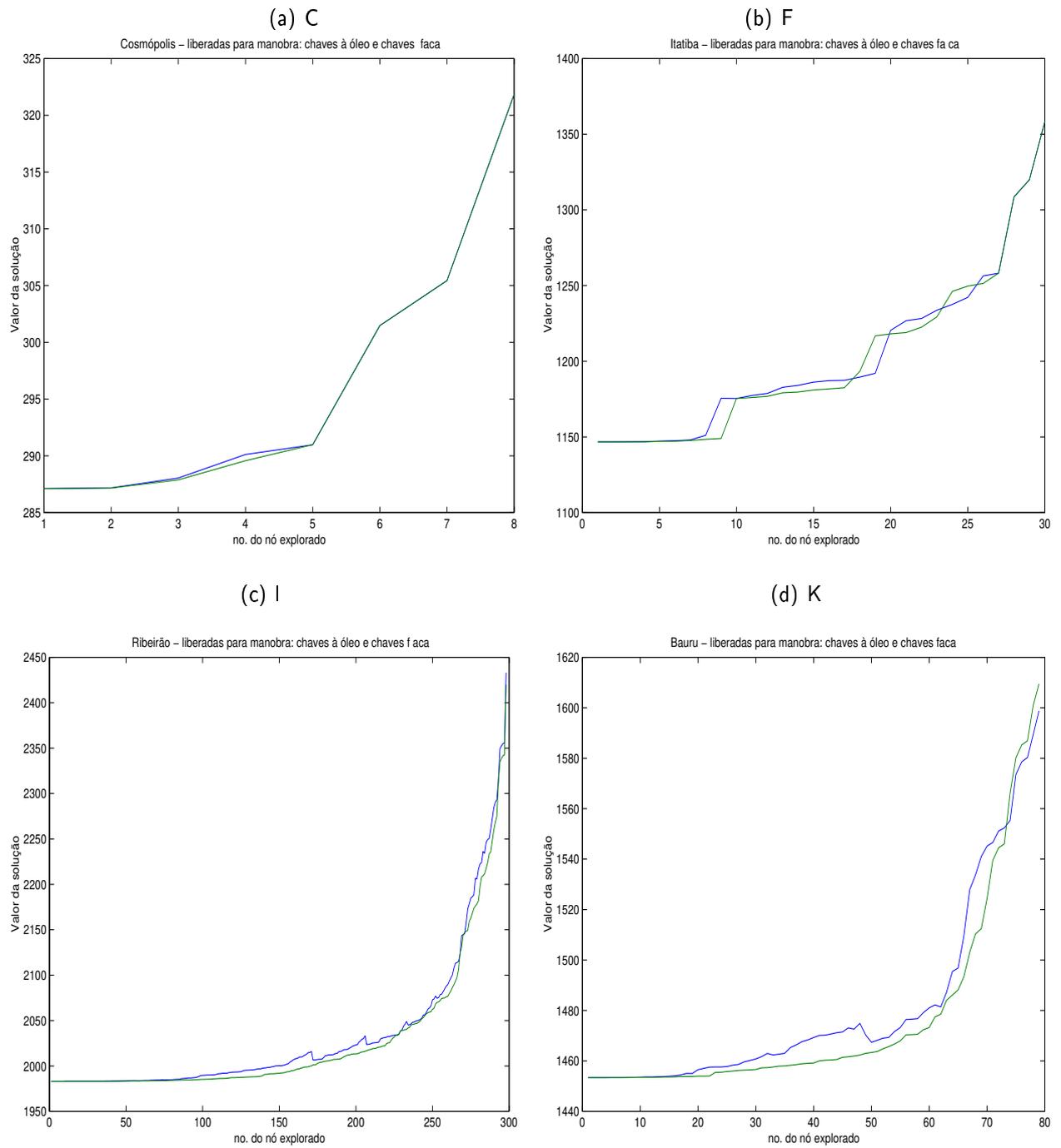


Figura 6.2: Comportamento das soluções em cada nível: curvas pontilhadas - soluções sem envenenamento; curvas sólidas - soluções com envenenamento. 2^o conjunto de testes

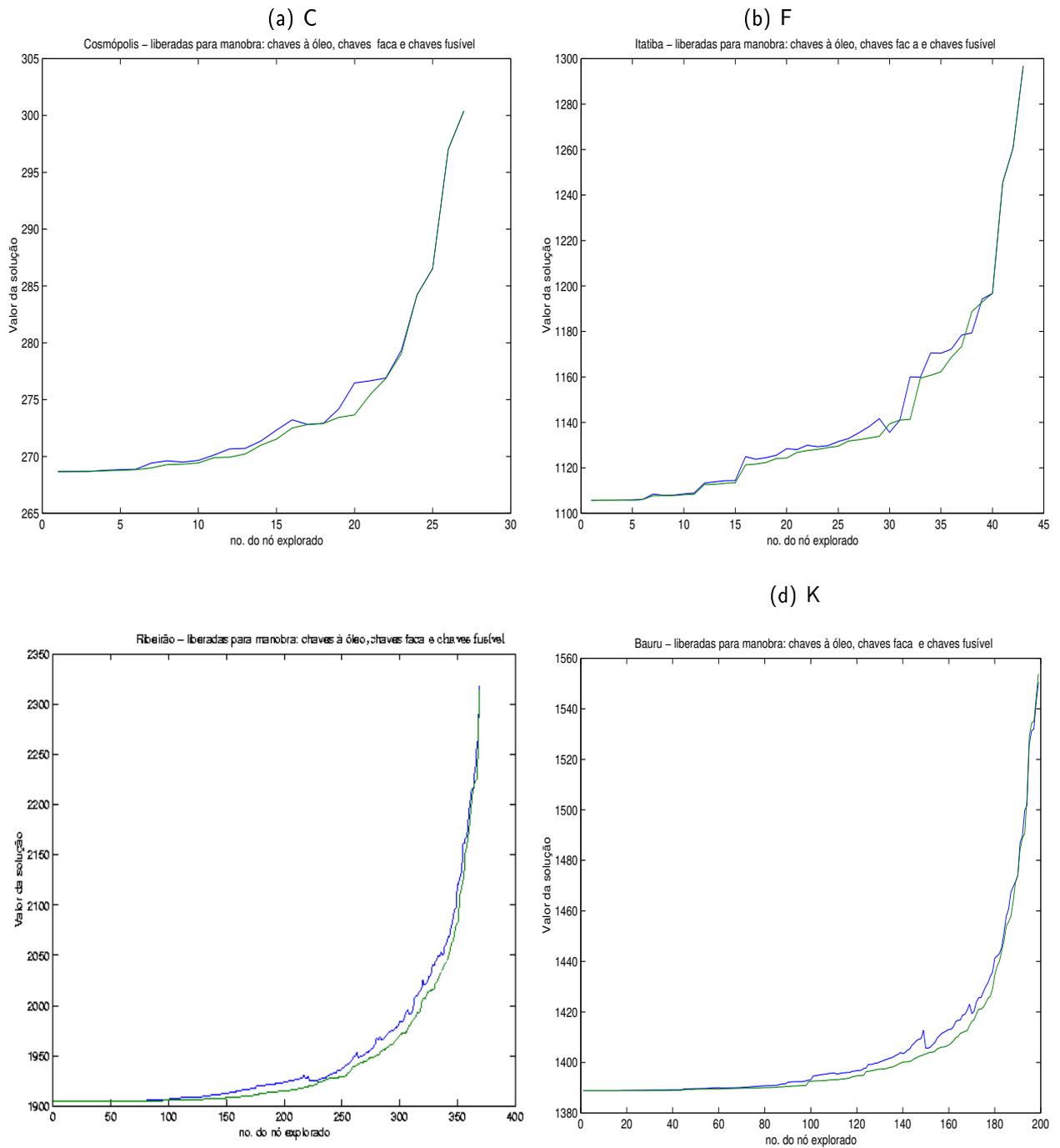


Figura 6.3: Comportamento das soluções em cada nível: curvas pontilhadas - soluções sem envenenamento; curvas sólidas - soluções com envenenamento. 3º conjunto de testes

Observando as curvas pontilhadas apresentadas nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3, pode-se perceber que os níveis iniciais de exploração indicam pouco aumento de perdas. Nos testes realizados com as redes das Tabelas 5.1 e 5.2, observou-se que a partir do nível m (¹) é que o aumento de perdas passa a ser expressível. O motivo para justificar este comportamento é o fato de que as primeiras chaves abertas para a dissolução dos ciclos serem aquelas que possuem menores valores de fluxos, levando a pequenas variações de aumento na solução de perdas. A partir do nível m , restarão na pilha ABERTO apenas chaves com maiores valores de fluxo, o que levará à um aumento maior na solução de perdas, a cada nível explorado.

Para se definir o critério da aplicação seletiva do método do gradiente reduzido para fluxos em redes necessita-se definir quão refinada deve ser a condição de otimalidade dos fluxos exigida no método.

Neste trabalho, dois valores foram utilizados para definir a aplicação seletiva do método. Quando o método do gradiente reduzido para fluxos em redes utiliza tolerância ε_1 (nos testes, $\varepsilon_1 = 1.0e^{-3}$) este é denominado *gradiente reduzido relaxado para fluxos em redes* e quando utiliza tolerância ε_2 (nos testes, $\varepsilon_2 = 1.0e^{-8}$) o método é denominado *gradiente reduzido refinado para fluxos em redes*. As curvas de crescimento representadas por linhas pontilhadas, apresentadas nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3, utilizaram o método do gradiente reduzido refinado em todos os nós da árvore de busca.

A decisão pela aplicação seletiva do método do gradiente reduzido para encontrar-se os fluxos ótimos para a configuração obtida no nó n ($n > 1$) depende de uma avaliação. Esta avaliação envolve a diferença entre o valor da solução de perdas obtida associada à configuração do nó $(n - 1)$ e o valor da solução de perdas associada a configuração do nó $(n - 2)$ ($n > 1$). A Figura 6.4 ilustra a sequência de nós envolvidos nesta avaliação.

A diferença entre o valor da solução de perdas obtida associada à configuração do nó $(n - 1)$ e o valor da solução de perdas associada à configuração do nó $(n - 2)$ será denominada *aumento de perdas* obtida no nó $(n - 1)$. Se esse aumento de perdas for muito pequeno, em

¹ m foi definido como a parte inteira do valor de $2/3$ do número total de chaves liberadas para manobra

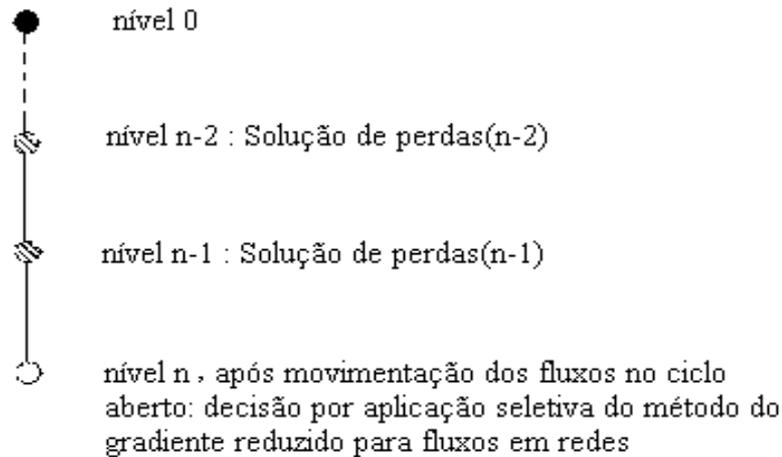


Figura 6.4: Sequência de nós envolvidos para decisão na aplicação seletiva do método do gradiente reduzido para fluxos em redes

relação a um valor pré estabelecido, opta-se por aplicar o método do gradiente reduzido relaxado para encontrar-se os fluxos ótimos para a configuração obtida no nó n ($n > 1$). Se ao contrário, esse aumento de perdas for considerado proporcionalmente grande, comparado à um valor pré-estabelecido, então aplica-se o método do gradiente reduzido refinado para encontrar-se os fluxos ótimos para a configuração obtida no nó n ($n > 1$).

Iremos denominar $aperdas(n - 1)$ ⁽²⁾ a diferença entre os valores das soluções de perdas nos nós $(n - 1)$ e $(n - 2)$, ($n > 1$). As constantes necessárias que pré-determinam a qualidade da aplicação do método do gradiente reduzido para fluxos em redes serão denominadas min (valor mínimo) e max (valor máximo). Com estas definições, os fluxos ótimos a serem determinados na configuração associada ao nó n ($n > 1$) podem ser obtidos pela:

- (1) aplicação do método do gradiente reduzido relaxado, se $min < aperdas(n - 1) < max$;
- (2) ou aplicação do método do gradiente reduzido refinado, se $aperdas(n - 1) > max$.

²para lembrar “aumento de perdas”

É interessante notar que no caso (2) o aumento das perdas obtido no nó $(n - 1)$ foi extrapolado segundo o valor pré-definido max . Por esse motivo opta-se por aplicar o método do gradiente reduzido refinado a fim de se obter, para essa configuração, os fluxos ótimos com qualidade de solução refinada. É bom observar que o método do gradiente reduzido no caso (2) utiliza um maior tempo computacional do que o usado no caso (1).

Se a diferença das soluções de perdas entre os nós $(n - 1)$ e $(n - 2)$ for menor do que o valor estipulado min , opta-se por não aplicar o método do gradiente reduzido para a obtenção dos fluxos ótimos para a configuração obtida no nó n ($n > 1$).

Deve-se observar que cada vez que se opta por deixar de aplicar o método do gradiente reduzido para fluxos em uma configuração obtida, carrega-se um “erro” para o próximo nó de exploração da árvore de busca. Este “erro” também é encontrado quando se opta por aplicar o método do gradiente reduzido relaxado para fluxos em uma configuração.

No primeiro caso, apenas os valores dos fluxos dos arcos pertencentes ao ciclo desfeito foram atualizados utilizando-se o *Passo 2* do método de preparação do problema relaxado $(\mathcal{P}_1)_r$ para estados sucessores. O “erro” aparece devido à não atualização do valores dos fluxos dos arcos não pertencentes ao ciclo desfeito. No segundo caso, devido à obtenção dos valores dos fluxos na rede com qualidade menos refinada. Assim os “erros” obtidos a cada nó explorado em que não houve a opção por aplicação do método do gradiente reduzido para fluxos ou houve opção por aplicação do método do gradiente reduzido relaxado para fluxos, trariam juntos um “erro” acumulado para os nós terminais.

Para prevenir que este “erro” acumulado não se torne muito grande e atrapalhe a qualidade da porcentagem final de perdas, estabeleceu-se mais um critério que envolve a avaliação de uma variável que acumula os aumentos de perdas obtidos a cada nó explorado. Esta variável foi denominada *aumento de perdas acumulado* até o nó $(n - 1)$ e indicada por $acumulado(n - 1)$ ($n > 2$). Cada vez que o valor desta variável ultrapassar um valor máximo permitido, aplica-se o método do gradiente reduzido refinado para obter-se os fluxos ótimos da configuração de rede representada pelo nó n , independente do aumento de perdas obtido

no nó $(n - 1)$, $n > 2$. Esta variável garante qualidade na porcentagem final de perdas a ser obtida. Cada vez que se obtém o novo valor da solução de perdas associado ao nó n , em que foi aplicado este critério, deve-se zerar a variável $acumulado(n - 1)$ para continuar a exploração.

A Figura 6.5 ilustra a disposição das variáveis para decisão da aplicação seletiva do método do gradiente reduzido para a obtenção dos fluxos ótimos em uma configuração de rede associada ao um nó n .

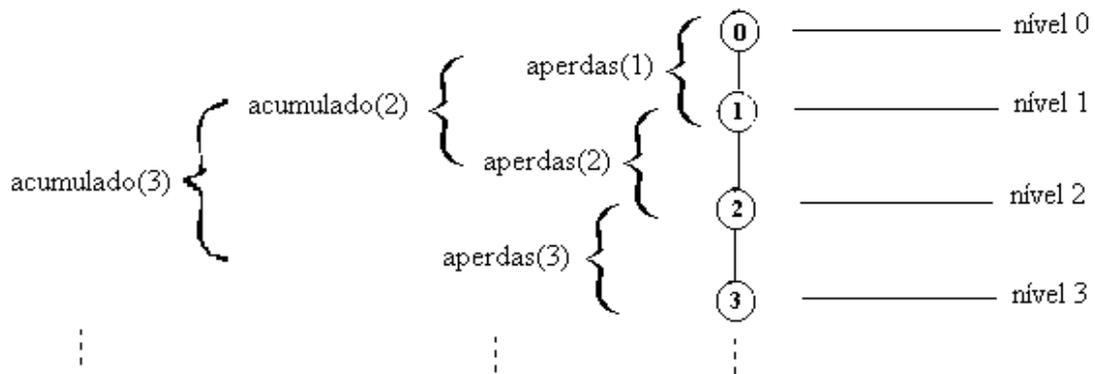


Figura 6.5: Síntese das idéias para restrições e esforço com a solução do problema de fluxo de custo mínimo

A seguir são mostrados os estudos de casos desenvolvidos e os resultados obtidos ao aplicar-se os critérios apresentados nesta seção.

6.1.1 Estudos de Casos II

Os resultados apresentados na Tabela 6.1 foram obtidos aplicando-se a busca heurística modular em três conjuntos de testes. Cada conjunto de teste difere do outro pelo tipo de chave que poderá ser manobrada, como apresentado no Capítulo 5. Para que a análise não se tornasse extensa, foram utilizadas 4 redes: C, F, I e K, especificadas nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Estes testes utilizaram a aplicação da busca heurística modular (BHM) com parâmetro de ramificação $p = 1$. Para o critério da aplicação seletiva do método do gradiente reduzido para fluxos em redes utilizou-se $min = 0,1$, $max = 0,5$ e $acumulado = 1,7$. É útil salientar que os valores de min , max e $acumulado$ foram obtidos experimentalmente, após vários testes com as redes especificadas nas Tabelas 5.1 e 5.2. O *Passo 0* do método da busca heurística modular sempre utiliza o método do gradiente reduzido refinado (GRF refinado) para encontrar os fluxos ótimos da configuração associada ao nó 0.

As colunas da Tabela 6.1 são definidas por:

coluna 1 - a rede a ser testada;

coluna 2 - o valor da solução de perdas, em kW, obtido ao final da aplicação do método BHM utilizando o método GRF refinado a cada abertura de chave (BHM1);

coluna 3 - o tempo computacional de execução gasto para a obtenção dos resultados apresentados na coluna 2 (hh:mm:ss);

coluna 4 - o percentual de redução de perdas obtido em relação as perdas iniciais associadas a cada rede;

coluna 5 - o valor da solução de perdas, em kW, obtido ao final da aplicação do método BHM utilizando o critério seletivo para o método GRF a cada abertura de chave (BHM2);

coluna 6 - o tempo computacional de execução gasto para a obtenção dos resultados apresentados na coluna 5 (mm:ss) e

coluna 7 - o percentual de redução de perdas obtido em relação as perdas iniciais associadas a cada rede.

Tabela 6.1: Resultados obtidos com a aplicação da busca heurística modular com avaliação da aplicação seletiva do método do gradiente reduzido para fluxos em redes. Parâmetro de ramificação $p = 1$

Rede	BHM1 -	com GRF	Refinado	BHM2 -	com GRF	Seletivo
	(a cada	abertura	de chave)	(a cada	abertura	de chave)
	Perdas	Tempos	Redução	Perdas	Tempo	Redução
	(kW)	(hh:mm:ss)	(%)	(kW)	(mm:ss)	(%)
(1 ^o conj.)						
C	402,38	1,49	12,18	402,38	0,11	12,18
F	1675,26	27,14	5,11	1675,82	2,03	5,08
I	3115,47	32:39,46	3,69	3126,81	7:05,67	3,34
K	2095,64	8:03,73	7,98	2113,98	36,74	7,17
(2 ^o conj.)						
C	397,60	2,14	13,22	397,36	1,48	13,22
F	1676,84	1:39,36	5,02	1676,84	8,46	5,02
I	3003,76	1:52:08,81	7,14	3003,76	9:07,11	7,14
K	1986,99	16:51,89	12,75	1973,82	52,62	13,33
(3 ^o conj.)						
C	370,86	14,34	19,06	370,86	1,32	19,06
F	1600,94	4:00,63	9,32	1600,94	21,42	9,32
I	2862,60	2:57:35,66	11,50	2862,60	10:47,74	11,50
K	1914,22	2:41:26,72	15,94	1914,22	54,98	15,94

Observando-se os resultados mostrados na Tabela 6.1, verificou-se uma queda considerável nos tempos computacionais obtidos ao aplicar-se os conceitos desenvolvidos nesta seção (caracterizando a BHM2) se comparados aos tempos computacionais obtidos quando os conceitos não foram utilizados (caracterizando a BHM1). Como exemplo, as redes I e K (3^o conjunto de testes), que nos resultados apresentam tempos computacionais de execução para aplicação da BHM1 na ordem de aproximadamente 3 horas, para a aplicação da BHM2 apresentam tempos computacionais, para os mesmos testes, na ordem de aproximadamente 11 minutos e 1 minuto, respectivamente. A redução de tempo computacional ficou explícita, nesses casos.

Ainda observando a Tabela 6.1, os valores de solução de perdas encontrados ao final da aplicação da BHM2 para os testes com as redes I e K (1^o conjunto de testes) foram diferentes e percentualmente maiores do que os respectivos valores encontrados ao final da aplicação da aplicação da BHM1. No teste com a rede K (2^o conjunto de testes) o valor de redução de perdas encontrado ao final da aplicação da BHM2 foi menor do que o obtido ao final da aplicação da BHM1. Nestes três casos a diferença entre as porcentagens finais não chegou a

um ponto percentual, indicando que a aplicação da BHM2 nas redes C, F, I e K se mostrou atrativa por apresentar resultados de qualidade semelhante, com tempos computacionais de execução muito menores.

As Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 apresentam as comparações entre as variações das reduções de perdas. As curvas pontilhadas apresentam o método da busca heurística modular sem a utilização dos conceitos desenvolvidos nesta seção (BHM1). As curvas sólidas apresentam o comportamento das soluções aplicando-se os conceitos desenvolvidos nesta seção (BHM2). É interessante observar que as curvas que mostram a evolução das soluções com e sem envenenamento, para cada um dos testes realizados, estão bastante próximas entre si, garantindo que o “erro” entre ambas praticamente inexistente. Isto mostra que para estes casos os conceitos de aplicação seletiva do método do gradiente reduzido para fluxos em redes desenvolvidos realmente preservaram a qualidade das soluções.

É útil salientar que foram utilizados estes critérios para os testes resumidos nas Tabelas 5.3, 5.7 e 5.9.

6.2 Tipos de Ramificações

Nesta seção iremos analisar o parâmetro de ramificação p (Seção 3.3) que determina o tamanho do subconjunto de arcos que poderão ser abertos para cada nó explorado na árvore de busca. Vale observar que, ao aumentar-se o parâmetro de ramificação, aumenta-se o espaço de busca explorado, e por conseguinte, aumenta-se os tempos de execução.

Serão apresentados dois tipos de testes: mesma ramificação para todos os nós, que chamaremos de ramificação fixa, e mesma ramificação a partir de um nó n , que chamaremos de ramificação variável.

6.2.1 Testes com Ramificação Fixa

Aqui serão analisados os resultados de testes utilizando-se o parâmetro de ramificação $p = 4$ fixo e definido como no método da busca heurística modular. Neste caso, a árvore de buscas terá o mesmo aspecto da árvore apresentada na Figura 6.6.

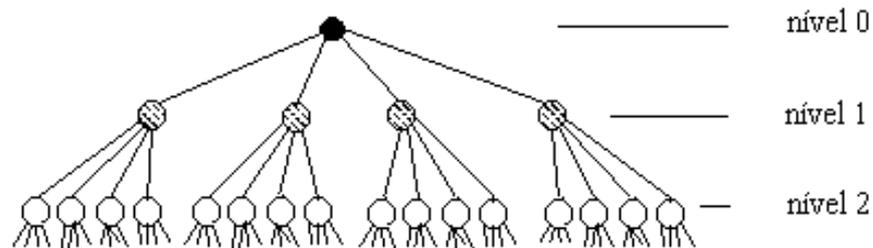


Figura 6.6: Árvore de buscas com ramificação fixa e $p = 4$ na busca heurística modular

Nestes testes foi utilizado o método do gradiente reduzido refinado para encontrar-se os fluxos ótimos em todos os nós de exploração. Os resultados são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Resultados obtidos com a aplicação da busca heurística modular com ramificação fixa e $p = 4$

Rede	Perdas c / BHM1 (kW)	Tempos (hh:mm:ss)	Redução (%)
(1 ^o conj.)			
C	402,38	15,71	12,18
F	1675,26	3:48,62	5,11
I	3126,81	4:16:20,40	3,34
K	2095,64	4:00:00,81	7,98
(2 ^o conj.)			
C	397,60	33,34	13,22
F	1676,84	16:26,90	5,02
I	3003,73	7:23:15,88	7,14
K	1973,82	2:05:31,33	13,33
(3 ^o conj.)			
C	370,86	2:48,62	19,06
F	1600,94	24:40,86	9,32
I	2857,49	11:44:05,38	11,66
K	1914,22	8:37:01,32	15,94

Os resultados obtidos na Tabela 6.2 indicam que para cada conjunto de redes testadas houve uma redução de perdas satisfatória. No caso da rede C (3º conjunto de testes) foi obtido quase 20% de redução de perdas. No entanto, os tempos computacionais de execução foram extremamente elevados para alguns dos testes. Por exemplo, para as redes I e K (nos 3 conjuntos de testes) foram obtidos tempos computacionais variando de 2 a quase 12 horas para a execução do método da busca heurística modular.

A seguir apresenta-se o critério da ramificação variável que visa diminuir os tempos computacionais obtidos com a ramificação fixa mantendo-se a qualidade da redução de perdas.

6.2.2 Testes com Ramificação Variável

Observando-se as curvas pontilhadas para os testes com as redes C, F, I e K, apresentadas nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3, pode-se perceber que os níveis iniciais de exploração causam pouco aumento de perdas. Foram analisadas curvas similares com o restante das redes especificadas nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Na maioria dos casos testados foi observado que a partir do nível $m^{(3)}$ é que o aumento de perdas passa a ser expressível. Isto mostra que não é necessário ramificar-se os nós nos níveis menores que m , uma vez que os aumentos de perdas obtidos nesses nós são muito pequenos, se comparado aos aumentos de perdas obtidos nos níveis maiores que m .

O critério que determina a ramificação com $p > 1$ nos nós da árvore de busca, a partir de um nó m , será denominado ramificação variável. A Figura 6.7 ilustra este conceito.

³ m foi definido como sendo a parte inteira do valor de $2/3$ do número total de chaves liberadas para manobra

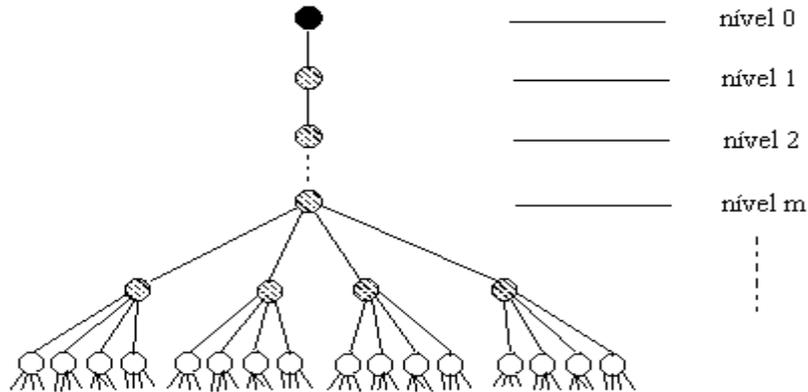


Figura 6.7: Ilustração do conceito de ramificação variável com $p = 4$

Os testes cujos resultados são apresentados na Tabela 6.3 utilizaram o conceito da ramificação variável com parâmetro $p = 4$ e $h(n) = 0.0$ a partir do nó m . Do nó inicial até o nó $(m - 1)$ utiliza-se o parâmetro de ramificação $p = 1$. Em todos os testes foram utilizados o método do gradiente reduzido refinado para encontrar-se os fluxos ótimos em todos os nós de exploração.

Tabela 6.3: Resultados obtidos com a aplicação da busca heurística modular com ramificação variável ($p = 4$) e $h(n) = 0.0$

Rede	Perdas c/ BHM1 (kW)	Tempos (hh:mm:ss)	Redução (%)
(1º conj.)			
C	402,38	6,10	12,18
F	1675,26	1:55,18	5,11
I	3126,81	1:55:14,73	3,34
K	2095,64	5:22,30	7,98
(2º conj.)			
C	397,60	14,56	13,22
F	1676,84	6:32,27	5,02
I	3003,73	3:03:07,82	7,14
K	1973,82	59:50,42	13,33
(3º conj.)			
C	370,86	1:20,63	19,06
F	1600,94	1:19,15	9,32
I	2857,49	3:24:16,07	11,66
K	1914,22	3:16:34,57	15,94

Observando-se os resultados obtidos na Tabela 6.3 verificou-se uma queda considerável nos tempos computacionais de execução do método da busca heurística modular em todos os testes, se comparados aos tempos computacionais de execução do método da busca heurística modular obtidos na Tabela 6.2.

O teste com a rede K (1^o e 2^o conjuntos de testes) apresentou diminuição na ordem de grandeza do tempo de execução. Os testes com as redes K e I (3^o conjuntos de testes) e I (1^o e 2^o conjuntos de testes) obtiveram reduções nos tempos computacionais de aproximadamente 12 horas, 8 horas, 4 horas e 7 horas (resultados obtidos na Tabela 6.2) para aproximadamente 3 horas, 3 horas, 2 horas e 3 horas, respectivamente. Esses ganhos nos tempos computacionais de execução são expressivos.

Pelos resultados obtidos na Tabela 6.3 pode-se notar que as reduções de perdas foram mantidas, se comparadas às reduções de perdas apresentadas na Tabela 6.2. Portanto a utilização do critério de ramificação variável mostrou ser uma alternativa atraente, quando se aplica uma busca heurística modular com parâmetro $p > 1$.

Além do parâmetro p , o método da busca heurística modular também prevê uma estimativa do aumento de perdas entre um nó n e um nó terminal, caracterizada pela função $h(n)$. Nos resultados apresentados por Cavellucci e Lyra (1997), a função $h(n) = c(n) \cdot \bar{l}$, onde $c(n)$ é o número de anéis em n e \bar{l} é uma estimativa do aumento médio de perdas com abertura de anéis do nó n até o nó terminal (Seção 3.3).

Quando $h(n)$, como já discutido na Seção 3.3, fornece uma boa estimativa das perdas adicionais ao longo do caminho, pode-se realizar podas mais cedo. Assim, o espaço de estados será reduzido, obtendo-se caminhos mais curtos até um nó final de solução. No Capítulo 5, os testes realizados levaram em consideração o valor $h(n) = 0.0$. A seguir são apresentados os dois tipos diferentes de função de estimativa para $h(n)$, desenvolvidos para este trabalho.

6.3 Refinamentos na Função de Estimativa de Perdas $h(n)$

6.3.1 Interpolação Linear

Suponha que se tem os pares (n_0, S_{n_0}) , (n, S_n) , onde S_{n_0} , S_n são os valores das soluções de perdas no nó n_0 e no nó n ($n_0 < n$), respectivamente. Suponha ainda que o nó n_0 esteja num nível n_0 da árvore de buscas e que o nó n esteja no nível n da árvore de buscas (nível $n_0 < n$). O que se deseja encontrar é uma estimativa do valor da solução final de perdas S_{n_f} já tendo explorado uma porção do espaço de estados do nível 0 até o nível n . Pode-se estimar o valor de $h(n)$ utilizando a equação da reta que passa pelos pontos (n_0, S_{n_0}) , (n, S_n) . Desta forma, o incremento $S_{n_f} - S_n$ fica aproximado pela diferença $p_1(n_f) - S_n$, calculada por:

$$p_1(n_f) - S_n = \frac{(S_n - S_{n_0})}{(n - n_0)}(n_f - n) = \tan(\alpha)(n_f - n) \quad (6.1)$$

onde α é o ângulo formado entre a reta e o eixo horizontal. Definimos a estimativa da função $h(n)$ por interpolação linear como $h_1(n) = p_1(n_f) - S_n$.

Geometricamente, podemos representar a diferença indicada em (6.1) como:

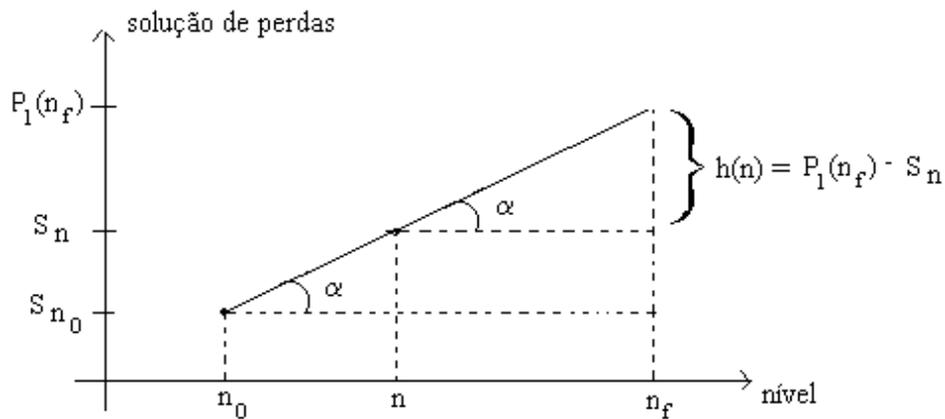


Figura 6.8: Estimativa da função $h(n)$ por interpolação linear

6.3.2 Interpolação Quadrática

Conhecendo-se os valores das soluções nos nós n_0 , n_1 e n ($n_0 < n_1 < n$) interpolamos os pontos (n_0, S_{n_0}) , (n_1, S_{n_1}) e (n, S_n) , onde S_{n_i} é o valor da solução de perdas no nó n_i ($i = 0, 1$) e S_n é o valor da solução de perdas no nó n . Utilizou-se uma aproximação por polinômio de grau 2 como uma alternativa para encontrar-se a estimativa do valor de solução de perdas S_{n_f} , tendo explorado uma porção do espaço de estados do nível 0 até o nível n .

Assim, $p_2(x) = a_2x^2 + a_1x + a_0$, onde os coeficientes (a_0, a_1, a_2) podem ser obtidos resolvendo-se o sistema linear 3x3 definido por:

$$S_{n_0} = a_2n_0^2 + a_1n_0 + a_0$$

$$S_{n_1} = a_2n_1^2 + a_1n_1 + a_0$$

$$S_n = a_2n^2 + a_1n + a_0.$$

Define-se a estimativa da função $h(n)$ por interpolação quadrática por $h_2(n) = p_2(n_f) - S_n$ e a representamos geometricamente como na Figura 6.9.

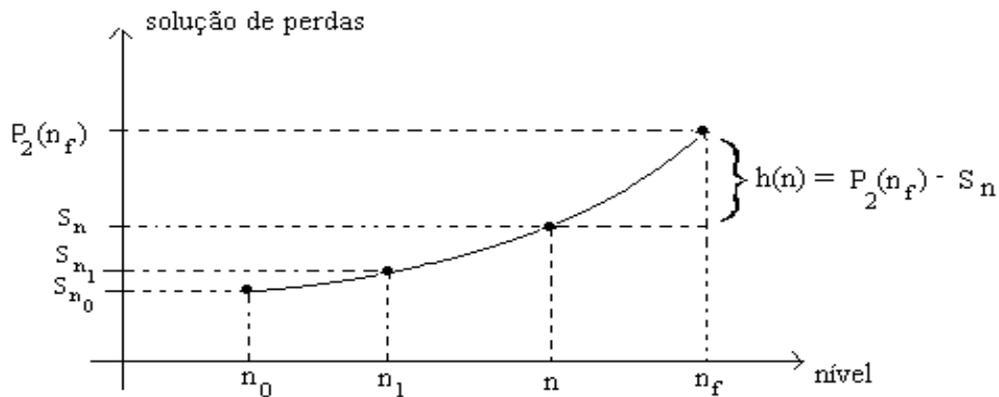


Figura 6.9: Estimativa da função $h(n)$ por interpolação quadrática

A seguir são mostrados os estudos de casos e os resultados obtidos ao utilizar-se os dois tipos de função de estimativa para $h(n)$.

6.4 Estudos de Casos III

6.4.1 Testes com Interpolação Linear

A Tabela 6.4 apresenta os resultados obtidos aplicando-se a busca heurística modular com parâmetro de ramificação fixa com $p = 4$ e estimativa da função $h(n)$ por interpolação linear. Nestes testes foram utilizados o método do gradiente reduzido refinado (BHM1) para encontrar-se os fluxos ótimos em todos os nós de exploração. Os testes realizados com esta definição de $h_1(n)$ apresentaram melhores resultados quando tomou-se n_0 como sendo o nó inicial e $(n - n_0) > m_1$ ⁽⁴⁾.

Tabela 6.4: Resultados obtidos com a aplicação da busca heurística modular com ramificação fixa ($p = 4$) e estimativa da função $h(n)$ por interpolação linear

Rede	Perdas c/ BHM1 (kW)	Tempos (hh:mm:ss)	Redução (%)
(1 ^o conj.)			
C	402,38	33,18	12,18
F	1675,26	1:01,31	5,11
I	3126,81	4:00:00,05	3,34
K	2095,64	20:30,86	7,98
(2 ^o conj.)			
C	397,36	2:08,53	13,27
F	1739,72	14:02,20	1,46
I	3003,73	4:00:00,28	7,14
K	1973,82	4:00:00,20	13,33
(3 ^o conj.)			
C	370,86	1:50,09	19,06
F	1581,13	30:05,33	10,43
I	2857,49	4:00:00,08	11,66
K	1914,22	4:00:00,17	15,94

⁴ m_1 foi definido como sendo a parte inteira do valor de 1/6 do número total de chaves liberadas para manobra. A constante 1/6 foi determinada experimentalmente realizando-se vários testes envolvendo as redes apresentadas nas Tabelas 5.1 e 5.2

Observando-se os resultados obtidos na Tabela 6.4 verificou-se que houve uma queda nos tempos computacionais de execução do método da busca heurística modular na maioria dos testes, se comparados aos tempos computacionais de execução do método da busca heurística modular obtidos na Tabela 6.2.

Os testes com as redes I (três conjuntos de testes) e K (3º conjunto de testes) foram os que apresentaram menores tempos computacionais se comparados aos testes cujos resultados aparecem na Tabela 6.2. Apenas os testes com as redes C (1º e 2º conjuntos de testes) e F (3º conjunto de testes) forneceram tempos computacionais mais elevados ao final da aplicação do método da busca heurística modular, se comparados aos tempos computacionais dos mesmos testes cujos resultados aparecem na Tabela 6.2. No entanto, os acréscimos nos tempos computacionais não são grandes — estes mantiveram-se na mesma ordem de grandeza.

A redução de perdas obtida ao final da execução do método da busca heurística modular nesses testes possuem a mesma qualidade se comparadas às reduções dos mesmos testes cujos resultados aparecem na Tabela 6.2. Observando-se o teste que envolve a rede F (3º conjunto de testes) percebe-se que houve uma melhora do valor de percentual de perdas ao final da aplicação do método da busca heurística modular, se comparado ao percentual de perdas mesmo teste cujo resultado aparece na Tabela 6.2. Isto se deve ao fato da estimativa $h_1(n)$ ter explorado partes do espaço de busca que ainda não tinham sido explorados nos testes anteriores.

O único prejuízo na qualidade da solução de perdas obtida ao final da execução da busca heurística modular foi apresentado no teste com a rede F (2º conjunto de testes). A estimativa de $h_1(n)$ neste caso, fez com que a redução final de perdas ficasse quase 3,6 pontos percentuais abaixo se comparada à redução final de perdas do mesmo teste, cujo resultado aparece na Tabela 6.2. No entanto, pelo restante dos testes realizados, podemos afirmar que a estimativa de $h(n)$ por interpolação linear mostrou-se uma estratégia atrativa.

A Tabela 6.5 apresenta os resultados obtidos ao aplicar-se a busca heurística modular com ramificação variável ($p = 4$) e estimativa da função $h(n)$ por interpolação linear.

Tabela 6.5: Resultados obtidos com a aplicação da busca heurística modular com ramificação variável ($p = 4$) e estimativa da função $h(n)$ por interpolação linear

Rede	Perdas c/ BHM1 (kW)	Tempos (hh:mm:ss)	Redução (%)
(1º conj.)			
C	402,38	5,22	12,18
F	1675,26	8:10,37	5,11
I	3126,81	4:00:00,11	3,34
K	2095,64	4:00:00,20	7,98
(2º conj.)			
C	397,36	7,80	13,27
F	1673,23	58:16,88	5,22
I	3003,73	4:00:00,09	7,14
K	1981,48	4:00:00,23	12,99
(3º conj.)			
C	370,86	6:41,33	19,06
F	1581,13	4:00:00,32	10,43
I	2857,49	4:00:00,19	11,66
K	1918,34	4:00:00,10	15,76

Observando-se os resultados apresentados na Tabela 6.5 verificou-se uma diminuição nos tempos computacionais obtidos na execução do método da busca heurística modular apenas nos testes com a rede C (1º e 2º conjuntos de testes). Estas diminuições podem ser observadas se forem comparadas aos tempos computacionais de execução do método da busca heurística modular aplicados aos mesmos testes, apresentados na Tabela 6.4. Para a rede C (2º conjunto de testes) pode ser observada uma diminuição na ordem de grandeza do tempo de execução, se comparado ao resultado obtido pelo mesmo teste apresentado na Tabela 6.4. Em todos os outros testes não foram verificadas diminuições nos tempos computacionais de execução.

Os testes com as redes F (2º conjunto de testes) e K (2º e 3º conjuntos de testes) apresentaram reduções de perdas diferentes ao final da execução do método da busca heurística modular, se comparados aos resultados obtidos pelos mesmos testes apresentados na Tabela 6.4. O teste com a rede F (2º conjunto de testes) obteve melhor redução de perdas ao final da execução do método da busca heurística modular, se comparado ao resultado obtido pelo mesmo teste apresentado na Tabela 6.4. Nos outros dois casos a diferença entre as porcentagens finais de perdas não chegou a um ponto percentual. Isto indica que a estratégia de ramificação variável aliada a estimativa da função $h(n)$ por interpolação linear não se

mostrou muito atrativa.

O que se esperava observar dos resultados obtidos na Tabela 6.5, utilizando-se a combinação dos dois conceitos (ramificação variável e estimativa por $h_1(n)$) eram tempos computacionais menores, o que não ocorreu. No entanto, esses resultados motivaram os estudos com interpolações quadráticas.

6.4.2 Testes com Interpolação Quadrática

A Tabela 6.6 apresenta os resultados obtidos aplicando-se a busca heurística modular com parâmetros de ramificação variável com $p = 4$ e função de estimativa por interpolação quadrática.

Tabela 6.6: Resultados obtidos com a aplicação da busca heurística modular com ramificação variável ($p = 4$) e estimativa da função $h(n)$ por interpolação quadrática

Rede	Perdas c/ BHM1 (kW)	Tempos (hh:mm:ss)	Redução (%)
(1 ^o conj.)			
C	402,38	1,43	12,18
F	1675,26	37,18	5,11
I	3115,47	59:57,63	3,69
K	2095,64	11:09,98	7,98
(2 ^o conj.)			
C	397,36	6,65	13,22
F	1676,84	4:03,87	5,02
I	2987,45	2:32:11,04	7,64
K	1986,99	33:00,35	12,75
(3 ^o conj.)			
C	370,86	52,40	19,06
F	1600,94	11:54,75	9,32
I	2857,49	4:00:00,32	11,66
K	1918,34	1:29:18,15	15,76

Observando-se os resultados obtidos na Tabela 6.6 verificou-se uma queda considerável nos tempos computacionais de execução do método da busca heurística modular em todos os testes, se comparados aos tempos computacionais de execução do método da busca heurística modular obtidos na Tabela 6.5.

Ainda observando os resultados obtidos na Tabela 6.6 pode-se notar que a qualidade das reduções de perdas se mantiveram, se comparada à qualidade das reduções de perdas obtidas na Tabela 6.5. Nos testes com as redes F (2º e 3º conjuntos de testes), I (1º e 2º conjuntos de testes) e K (3º conjuntos de testes) foram obtidas porcentagens de redução de perdas diferentes ao final da execução do método da busca heurística modular, se comparadas às porcentagens de redução de perdas obtidas nos mesmos testes, apresentados na Tabela 6.5.

Especificamente para os testes com as redes F e K (2º conjuntos de testes) pode ser observado que o critério de interpolação linear encontrou reduções de perdas com melhores porcentagens de redução. No entanto, comparando-se estas com as respectivas reduções de perdas obtidas com o critério da interpolação quadrática, verifica-se que foram necessários tempos de busca maiores para encontrar reduções com apenas 0,30 de ponto percentual menores (aproximadamente).

Nos testes com a rede I (1º e 2º conjuntos de testes) foram obtidas melhores porcentagens de redução de perdas, se comparadas aos resultados de redução obtidos pelos mesmos testes que aparecem nas Tabelas 6.2 e 6.5. Isto indica que, nestes testes, o critério de utilização da função de estimativa $h(n)$ por interpolação quadrática mostrou-se mais eficiente do que o critério de interpolação linear.

6.4.3 Testes com Interpolação Linear e Aplicação Seletiva do GR

Foram realizados testes utilizando-se os conceitos de ramificação variável e a estimativa para $h(n)$ por interpolação linear, conjuntamente com o conceito de aplicação seletiva do método do gradiente reduzido para os fluxos ótimos na configuração adquirida. Os resultados são apresentados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7: Resultados obtidos com a aplicação da busca heurística modular com ramificação variável ($p = 4$), estimativa da função $h(n)$ por interpolação linear e aplicação seletiva do método do gradiente reduzido para fluxos em redes

Rede	Perdas c/ BHM2 (kW)	Tempos (hh:mm:ss)	Redução (%)
(1^o conj.)			
C	402,38	0,22	12,18
F	1675,82	46,42	5,08
I	3115,51	4:00:00,09	3,68
K	2107,62	4:00:00,80	7,45
(2^o conj.)			
C	397,36	0,55	13,22
F	1676,84	11:42,72	5,02
I	3003,73	4:00:00,32	7,14
K	1958,59	4:00:00,79	14,00
(3^o conj.)			
C	370,86	47,79	19,06
F	1600,94	1:58:28,84	9,32
I	2862,60	4:00:00,11	11,50
K	1914,22	4:00:00,69	15,94

Observando-se os resultados apresentados na Tabela 6.7 verificou-se uma redução nos tempos computacionais obtidos na execução do método da busca heurística modular, em todos os testes. Estas reduções podem ser observadas se forem comparados os tempos computacionais de execução do método da busca heurística modular aplicados aos mesmos testes, apresentados na Tabela 6.5. Nos testes com as redes C (três conjuntos de testes) e F (1^o conjunto de testes) foram obtidas diminuições na ordem de grandeza dos tempos de execução.

Ainda observando os resultados obtidos na Tabela 6.7 pode-se notar que a qualidade das reduções de perdas se manteve, se comparada à qualidade das reduções de perdas obtidas na Tabela 6.5. Nos testes com as redes F (três conjuntos de testes), I (1^o e 3^o conjuntos de testes) e K (três conjuntos de testes) foram obtidas reduções de perdas diferentes (analisadas a seguir) ao final da execução do método da busca heurística modular, se comparadas às reduções de perdas obtidas nos mesmos testes, apresentados na Tabela 6.5.

Comparando-se as porcentagens de redução de perdas nos testes com a rede F (1^o e 2^o conjuntos de testes) pode ser observado que os tempos de busca obtidos, que aparecem na Tabela 6.5, são maiores que os tempos de busca que aparecem na Tabela 6.7, para encontrar

reduções que são aproximadamente 0,2 ponto percentual menores.

No teste com a rede F (3º conjuntos de testes) foi obtida redução de perdas que é a aproximadamente 1,2 ponto percentual acima (comparada ao teste cujo resultado aparece na Tabela 6.5) e exatamente igual ao valor de redução obtida pelo teste cujo resultado aparece na Tabela 6.2.

Nos testes com as redes I (1º conjunto de testes), K (2º e 3º conjuntos de testes) as porcentagens de redução obtidas foram melhores, mas os tempos de busca necessários foram iguais comparado-se aos testes cujos resultados aparecem na Tabela 6.5.

Nos testes com as redes K (1º conjunto de testes) e I (3º conjunto de testes) as porcentagens ficaram aproximadamente 0,5 ponto percentual com iguais tempos computacionais necessários para a busca, se comparados aos resultados obtidos pelos testes apresentados na Tabela 6.5.

Esta análise indica que a aplicação conjunta dos critérios de ramificação variável, estimativa da função $h(n)$ por interpolação linear e aplicação seletiva do método do gradiente reduzido para fluxos não se mostrou tão eficiente quanto a aplicação em separado de cada um dos critérios.

6.4.4 Testes com Interpolação Quadrática e Aplicação Seletiva do GR

Realizaram-se testes usando-se os conceitos de ramificação variável e estimativa para $h(n)$ por interpolação quadrática, conjuntamente com o conceito de aplicação seletiva do método do gradiente reduzido para os fluxos ótimos na configuração adquirida. Os resultados são apresentados na Tabela 6.8.

Tabela 6.8: Resultados obtidos com a aplicação da busca heurística modular com ramificação variável ($p = 4$), estimativa da função $h(n)$ por interpolação quadrática e aplicação seletiva do método do gradiente reduzido para fluxos em redes

Rede	Perdas c/ BHM2 (kW)	Tempos (hh:mm:ss)	Redução (%)
(1º conj.)			
C	402,38	1,26	12,18
F	1675,82	12,36	5,08
I	3126,81	36:11,09	3,34
K	2113,98	4:07,33	7,17
(2º conj.)			
C	397,36	0,38	13,22
F	1676,84	53,11	5,02
I	3003,73	2:02:10,19	7,14
K	1973,82	9:51,21	13,33
(3º conj.)			
C	370,86	7,19	19,06
F	1600,94	1:11,43	9,32
I	2862,60	3:34:18,61	11,50
K	1914,22	1:10:33,14	15,94

Observando-se os resultados obtidos na Tabela 6.8 verificou-se uma queda considerável nos tempos computacionais de execução do método da busca heurística modular em todos os testes, se comparados aos tempos computacionais de execução do método da busca heurística modular obtidos na Tabela 6.7. Nos testes com as redes F (2º e 3º conjuntos de testes), I (1º conjunto de testes) e K (1º e 2º conjuntos de testes) foram observadas reduções na ordem de grandeza dos tempos computacionais de execução. Reduções nos tempos computacionais de execução também foram verificadas, em todos os testes, se comparados aos tempos computacionais de execução apresentados na Tabela 6.6.

Ainda observando os resultados obtidos na Tabela 6.8 pode-se notar que a qualidade das reduções de perdas se manteve, comparada à qualidade das porcentagens das reduções de perdas apresentadas na Tabela 6.7.

Nos testes com as redes I (1º conjuntos de testes) e K (1º e 2º conjuntos de testes) foram obtidas reduções de perdas maiores ao final da execução do método da busca heurística modular, se comparadas às reduções de perdas obtidas nos mesmos testes, apresentada na Tabela 6.7. No entanto, a diferença entre as reduções não chegou a 0,7 de ponto percentual,

obtidas com tempos de busca menores que 40 minutos (os resultados apresentados na Tabela 6.7 mostram tempos de busca de 4 horas, para cada um destes testes). Isto indica que a aplicação conjunta dos conceitos de ramificação variável, estimativa da função $h(n)$ por interpolação quadrática e aplicação seletiva do método do gradiente reduzido para fluxos mostrou-se mais eficiente.

6.5 Conclusões

Unindo-se os resultados dos Capítulos 5 e 6, reforça-se a opção por aplicação do método Reconfigurador de Redes (método da busca heurística modular seguido da aplicação do método do ajuste fino por troca de ramos) como alternativa para a obtenção de redução de perdas utilizando-se reconfigurações, como já mencionado no Capítulo 5.

Para testes em que se quer realizar buscas rápidas, deve-se optar pelo método Reconfigurador de Redes com parâmetro de ramificação $p = 1$, conjuntamente com o critério de aplicação seletiva do método do gradiente reduzido para fluxos em redes. É útil salientar que estes foram os critérios utilizados para os testes com as redes apresentadas nas Tabelas 5.3, 5.7 e 5.9. Para testes em que o tempo não seja fator limitante para a realização da busca, optar pela aplicação do método **Reconfigurador de Redes** com parâmetro de ramificação $p > 1$, função de estimativa $h(n)$ por interpolação quadrática e aplicação seletiva do método do gradiente reduzido para fluxos em redes.

No Apêndice A será apresentada a descrição de uma metodologia para a resolução do problema de redução de perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica, tratando de forma unificada o problema de reconfiguração de redes com o de localização e dimensionamento de capacitores. Serão abordadas 3 metodologias distintas baseadas no método **Reconfigurador de Redes** e em métodos que envolvem algoritmos evolutivos.

Capítulo 7

Conclusões

Este trabalho apresenta um conjunto de inovações para resolver o problema de redução de perdas através de reconfigurações em sistemas reais de distribuição de energia elétrica. As inovações incluem um conjunto de desenvolvimentos específicos para tratar sistemas de distribuição de grande porte e estão associadas a procedimentos de buscas informadas em grafos, da área de inteligência artificial, métodos de otimização não-linear para redes e heurísticas baseadas em características próprias do problema.

O trabalho apresentou também uma nova abordagem para redução de perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica através de estratégia conjunta de reconfigurações e instalação de capacitores em pontos adequados da rede. De forma análoga ao problema de redução de perdas por reconfigurações, estas técnicas foram desenvolvidas para abordar o problema em sistemas reais de grande porte.

Os pontos enumerados a seguir são possíveis desdobramentos deste trabalho.

- (1) Proposta de uma estratégia de busca de soluções para o problema em duas etapas, baseando-se em métodos de buscas informadas em grafos: a primeira etapa faz uma investigação ampla no espaço de estados; a segunda etapa faz uma melhoria local, em

torno da melhor solução encontrada na primeira etapa. Esses aspectos foram discutidos no Capítulo 3.

- (2) Desenvolvimento de um conjunto de procedimentos para abordagens de problemas de otimização não linear de fluxos em redes com estruturas "próximas" — considera-se que as estruturas são próximas quando as redes correspondentes aos vários problemas diferem apenas pela retirada, ou inclusão, de alguns arcos. Estas idéias foram discutidas no Capítulo 4.
- (3) Desenvolvimento de um conjunto de conceitos para controle de ramificações das buscas informadas em grafos; concepção e análise de funções heurísticas para estimativa de perdas. As contribuições estão desenvolvidas nos Capítulos 3 e 6.
- (4) Nova abordagem para o problema de redução de perdas em redes reais por reconfigurações e instalação de capacitores. Tema discutido no Apêndice A.
- (5) Desenvolvimento de um conjunto de procedimentos que permitem o uso seletivo do método de otimização; esses procedimentos, elaborados a partir da análise de características próprias do problema, permitiram reduções nos tempos de execução de pelo menos uma ordem de grandeza. Na grande maioria dos casos não houve comprometimento na qualidade de soluções e quando houve, as soluções estavam muito próximas. Os conceitos foram apresentados no Capítulo 6, onde são denominados "metaconhecimento".
- (6) Análise minuciosa de estudos de casos envolvendo a aplicação dos métodos em redes reais de grande porte. Os estudos estão apresentados nos Capítulos 5 e 6 e no Apêndice A.

Os estudos desenvolvidos neste trabalho resultaram em metodologias amplamente utilizadas por empresas de energia do Estado de São Paulo para o planejamento da operação de sistemas reais de distribuição de energia elétrica (Manhães et al., 2002).

Algumas perspectivas de desdobramentos deste trabalho são enumeradas a seguir.

- (1) Estudo do problema de redução de perdas por reconfigurações em situações de variações de carga de forma não uniforme (isto é, com variações distintas em cada ponto da rede). Neste problema, é fundamental encontrar o compromisso adequado entre redução de perdas e número de chaveamentos.
- (2) Aplicação das metodologias desenvolvidas no Apêndice A, considerando instalação de capacitores variáveis.
- (3) Estudo do problema de controle de capacitores chaveados associado ao problema de reconfiguração de redes.
- (4) Novas alternativas para solução do problema de fluxos de carga com subsídios da área de pontos interiores podem permitir o resgate da abordagem para otimização de fluxos proposta por Merlin e Back (através de fluxos de carga para redes com anéis). Essas idéias devem ser comparadas com a alternativa para otimização desenvolvida neste trabalho, através de procedimentos baseados no método do gradiente reduzido.

Apêndice A

Reconfiguração e Instalação de Capacitores para Redução de Perdas em Redes Reais de Distribuição de Energia Elétrica

Este apêndice apresenta a descrição de uma metodologia para a resolução do problema de redução de perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica, tratando de forma unificada o problema de reconfiguração de redes com o de localização e dimensionamento de capacitores.

A metodologia desenvolvida compara duas abordagens integradas que utilizam os métodos da busca heurística modular, do ajuste fino por troca de ramos e do método identificado como localizador de capacitores. Este último utiliza algoritmos genéticos e meméticos (Mendes et al., 2001) como técnicas para otimizar a instalação de capacitores em redes de distribuição de energia elétrica, cujos detalhes são apresentados no trabalho de Mendes e co-autores (2002), em anexo no Apêndice B.

Capacitores podem reduzir perdas e melhorar o perfil das tensões através da redução dos fluxos de potências reativas nos condutores. Metodologias para redução de perdas em redes de distribuição através da instalação de capacitores vêm sendo desenvolvidas desde os anos 50. Desde meados dos anos 80, foram identificados benefícios de tratar de forma integrada a redução de perdas através de reconfiguração de rede e instalação de capacitores (Brooks et al., 1986). Peponis e co-autores (1995), Jiang e Baldick (1996) e Su e Lee (2001), já mencionados na Seção 1.4.11, propuseram abordagens heurísticas para o problema integrado.

A Seção A.1 apresenta a descrição do problema de localização e dimensionamento de capacitores. A Seção A.2 apresenta a descrição das abordagens citadas para o problema de redução de perdas por reconfigurações de redes e instalação de capacitores. Finalizando o capítulo, a Seção A.3 apresenta os estudos de casos comparativos envolvendo as abordagens propostas neste trabalho.

A.1 O Problema de Localização e Dimensionamento de Capacitores

O problema de localização e dimensionamento de capacitores (PLDC) está definido, neste trabalho, para redes primárias de distribuição de energia elétrica. O objetivo é encontrar-se o número, a localização e o tamanho de bancos de capacitores fixos a serem instalados nos alimentadores da rede, tal que haja a maior redução de perdas e o menor custo total de instalação dos capacitores.

Na bibliografia existente sobre o PLDC são consideradas situações de cargas fixas e variáveis. Neste trabalho, iremos considerar situações de cargas fixas. O intuito desta particularização é simplificar a apresentação da formulação do problema.

Matematicamente, podemos descrever o PLDC como:

$$\text{Min}_{Q_C} \{(\sum_{k \in \mathcal{N}} f_{\text{custo}}(Q_{Ck})) + \varphi_e \eta (\sum_{k \in \mathcal{N}} \sum_{i \in \mathcal{A}_k} r_{ki} \frac{P_{ki}^2 + Q_{ki}^2}{V_k^2})\} \quad (\text{A.1})$$

$$\text{s.a.} \quad (\text{A.2})$$

$$P_k = \sum_{i \in \mathcal{A}_k} P_{ki} + P_{Lk} \quad (\text{A.3})$$

$$Q_k = \sum_{i \in \mathcal{A}_k} Q_{ki} + Q_{Lk} - Q_{Ck} \quad (\text{A.4})$$

$$V_{ki}^2 = V_k^2 - 2(r_{ki} P_{ki} + y_{ki} Q_{ki}) \quad (\text{A.5})$$

$$\underline{V}_k \leq V_k \leq \overline{V}_k \quad (\text{A.6})$$

$$Q_{Ck} \in \mathcal{Q} \quad (\text{A.7})$$

$$\mathcal{G}' = [\mathcal{N}, \mathcal{A}'] \text{ uma \u00e1rvore} \quad (\text{A.8})$$

onde:

- Q_C \u00e9 o conjunto de capacitores instalados na rede,
- $f_{\text{custo}}(Q_{Ck})$ \u00e9 a fun\u00e7\u00e3o que representa o custo anualizado de um capacitor capaz de fornecer a pot\u00eancia reativa Q_{Ck} , no n\u00f3 k ,
- Q_{Ck} \u00e9 a *pot\u00eancia reativa* injetada pelo capacitor instalado no n\u00f3 k (n\u00e3o havendo capacitor instalado, a pot\u00eancia Q_{Ck} \u00e9 nula),
- φ_e \u00e9 o custo m\u00e9dio da energia, em R\$,
- η \u00e9 o fator de transforma\u00e7\u00e3o de kW em MWh⁽¹⁾,
- P_k \u00e9 o fluxo de *pot\u00eancia ativa* no arco k ,
- Q_k \u00e9 o fluxo de *pot\u00eancia reativa* no arco k ,
- V_k \u00e9 a tens\u00e3o no n\u00f3 k ,

¹neste trabalho foi utilizado a constante $8,76 = (\text{n\u00famero de horas em 1 ano})/1000$

- P_{Lk} é a demanda de *potência ativa* no nó k ,
- Q_{Lk} é a demanda de *potência reativa* no nó k ,
- r_{ki} e y_{ki} representam, respectivamente, resistências e reatâncias associadas ao arco ki (com origem no nó k),
- \underline{V}_k e \overline{V}_k são os limites (inferior e superior) admitidos para a tensão no nó k (V_k),
- e \mathcal{Q} é o conjunto de valores de potências capacitivas disponíveis para instalação.

A primeira parcela da *função objetivo* (A.1) representa o valor total anualizado do investimento com a instalação de capacitores. A segunda parcela da *função objetivo* (A.1) representa o valor total da energia dissipada ao longo de um ano na rede de distribuição em estudo.

Os limites para os fluxos de potências também precisam ser respeitados. No entanto, a instalação adequada de capacitores tende a reduzir o fluxo total de potências nos arcos; logo, não precisam ser considerados na formulação do problema PLDC. Nesta formulação, as equações A.3 e A.4 estão baseadas no trabalho de Baran e Wu (1989a), com extensões para considerar as ramificações nas redes (Vargas et al., 2002).

A próxima seção propõe uma nova visão de abordagem integrada para o problema de redução de perdas por reconfigurações de rede e instalação de capacitores.

A.2 Abordagens para o Problema de Redução de Perdas por Reconfigurações e Instalação de Capacitores

Através de um exemplo didático simples, Jiang e Baldick (1996) mostraram que a redução de perdas por reconfiguração de redes e instalação de capacitores deve ser abordada como

um problema unificado; a solução sucessiva dos dois problemas pode levar a alternativas sub-ótimas (Seção 1.4.11). No entanto, seus estudos de casos em rede real indicam que o acoplamento entre esses problemas não é muito forte. Assim, uma estratégia simples de abordagens cíclicas do problema de reconfiguração e instalação de capacitores, como proposto por Peponis e co-autores (1995), pode levar a soluções não muito distantes da otimalidade. A Figura A.1 detalha a estratégia cíclica proposta por Peponis e co-autores (1995).

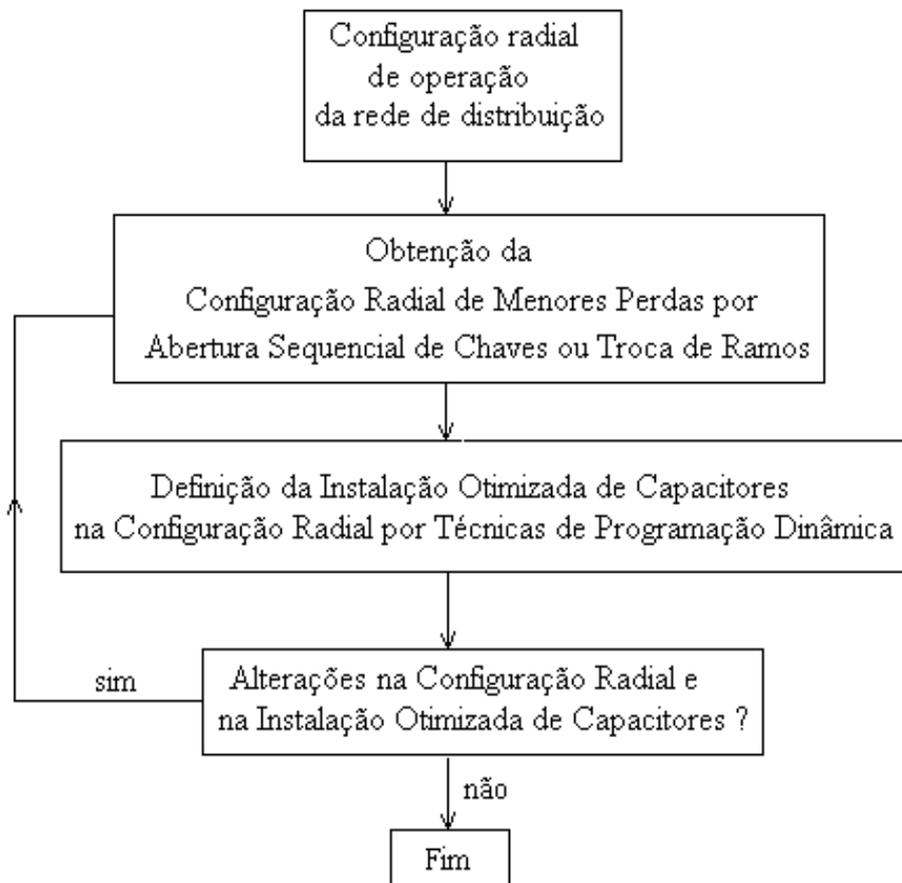


Figura A.1: Estratégia cíclica para resolução do problema de redução de perdas desenvolvida por Peponis e co-autores (1995)

As duas estratégias unificadas para redução de perdas desenvolvidas neste trabalho possuem refinamentos adicionais em relação ao método proposto por Peponis e co-autores (1995).

São baseadas nas abordagens de reconfigurações de redes através da aplicação dos métodos de busca heurística modular e troca de ramos, desenvolvidos nos Capítulos 3 e 4, e na instalação otimizada de capacitores, através de algoritmos genéticos e meméticos desenvolvidos por Alexandre Mendes (Mendes et al., 2001). A Figura A.2 apresenta as duas estratégias unificadas desenvolvidas neste trabalho.

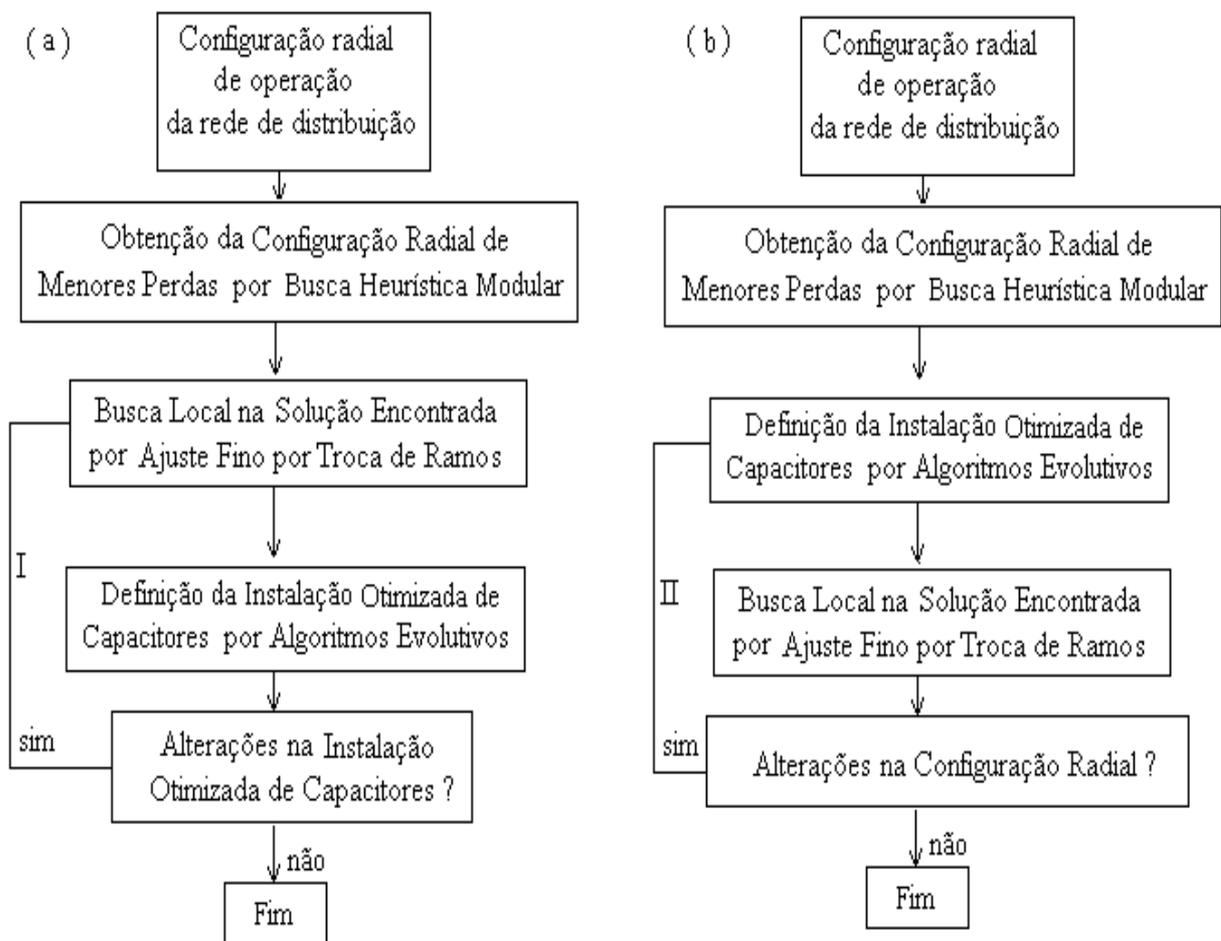


Figura A.2: Estratégias unificadas para o problema de redução de perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica

A sequência de passos apresentada na Figura A.2(a) define a primeira estratégia unificada. Esta propõe que após a obtenção da configuração radial de menores perdas, obtida pela

aplicação do procedimento de busca heurística modular (BHM) seja realizada uma busca local na vizinhança dessa solução através da aplicação do método do ajuste fino por troca de ramos (AFTR). A seguir realiza-se uma instalação otimizada de capacitores para a configuração radial obtida pela aplicação do método localizador de capacitores (LC). A unificação dos problemas se dá pelo laço de realimentação entre a busca por uma nova configuração radial com redução de perdas, através da aplicação do método AFTR, e uma nova instalação otimizada de capacitores para essa nova configuração radial, através da aplicação do método LC. Continua-se nesse laço até que não seja mais possível obter redução de perdas.

A aplicação da busca heurística modular, na estratégia unificada apresentada, realiza uma busca no espaço de soluções encontrando uma boa configuração de rede. Nessa busca, utiliza-se a hipótese simplificadora de que as redes são bem compensadas (Capítulo 2). A aplicação do ajuste fino por troca de ramos melhora a solução encontrada, realizando uma busca local em sua vizinhança. Nesta etapa, o ajuste fino considera os reativos de forma explícita; se eventuais desequilíbrios entre as cargas ativas e reativas foram encontradas, o método os corrige, podendo levar a novas configurações, mais adequadas a essa solução. A última etapa é a compensação de reativos obtida pela aplicação da instalação otimizada de capacitores.

Suponha que se tenha uma situação ideal, em que se aplique a busca heurística modular para encontrar a configuração de mínimas perdas para redes bem compensadas. Suponha, nesta situação ideal, que se aplique o procedimento de instalação otimizada de capacitores para a compensação perfeita de reativos na configuração obtida. Nesta situação, a melhor estratégia de coordenação entre o problema de redução de perdas por reconfigurações de redes e o problema de redução de perdas por colocação de capacitores seria simplesmente a execução em sequência da BHM e a instalação otimizada de capacitores, sem qualquer realimentação.

Voltando para a situação mais realista, onde não é possível se garantir otimalidade global, o método AFTR passa a ter sua função de correções e ajustes. No entanto, a análise realizada

para o cenário de situação ideal indica que esta função deve ser exercida após a etapa de instalação otimizada de capacitores, onde a configuração apresenta uma maior redução nas perdas obtida pela compensação no total de fluxos reativos presentes na rede. Um processo de realimentação entre as etapas de AFTR e instalação de capacitores cria a possibilidade de refinamentos sucessivos de soluções. A sequência de passos, que definem esta nova estratégia integrada, está apresentada na Figura A.2(b).

Esta segunda estratégia propõe que após a obtenção da melhor configuração radial de rede através da aplicação do procedimento de BHM seja realizada uma instalação otimizada de capacitores através da aplicação do método LC. Em seguida promove-se uma busca local nesta configuração, através da aplicação do método AFTR. A unificação dos problemas se dá através da realimentação entre uma nova instalação ótima de capacitores para a configuração e uma nova busca na vizinhança da solução correspondente através do ajuste fino por troca de ramos. O laço é interrompido quando não há mais possibilidade de se obter redução de perdas.

A próxima seção apresenta os estudos de casos desenvolvidos que garantem o bom desempenho das estratégias unificadas desenvolvidas neste trabalho, aplicadas em redes reais e de dimensão grande.

A.3 Estudos de Casos

Nos estudos de casos apresentados nos Capítulos 4, 5, 6, utilizou-se as cargas previstas para os horários de maiores demandas. Os testes que constam nesta seção consideram também perfis de demandas fixas, porém as perdas iniciais são corrigidas pelo parâmetro *fator de perdas*. A seguir, resume-se a caracterização deste parâmetro.

Fator de Perdas

O fator de perdas (FP) é a relação entre a perda de energia média e a perda de energia máxima ao longo de um período de tempo t (Gönen, 1986).

O fator de perdas depende dos valores do fator de carga e do parâmetro λ ($0 \leq \lambda \leq 1$) e pode ser calculado por $FP = \lambda * (FC)^2 + (1 - \lambda) * FC$. O fator de carga (FC) é a relação entre a carga média e a carga máxima ao longo de um período de tempo t (Gönen, 1986).

Características das Redes Estudadas

A Tabela A.1 reproduz as características das redes presentes na Tabela 5.1. A diferença entre os valores destas duas tabelas aparece na coluna 8, que mostra os valores das perdas iniciais de cada configuração de rede corrigidos pelo fator de perdas FP (utilizando FC=0,6). É útil salientar que os testes também levam em consideração as outras características das redes, presentes na Tabela 5.2.

Tabela A.1: Características das redes - Correção das perdas iniciais (FC=0,6)

Rede	No. de nós	No. de arcos	No. de alim.	Base (V)	Carreg. (kW)	Perdas iniciais (kW)
A	423	435	1	11900	10325,00	64,71
B	646	655	1	13200	11388,00	146,04
C	1528	1558	3	11900	19612,00	181,45
D	1597	1644	2	13800	30358,99	175,17
E	1449	2490	3	11400	42383,96	400,42
F	2274	2316	3	11400	59433,00	699,16
G	6066	6269	203	11400	152081,73	686,89
H	6097	6332	203	11400	166154,58	1133,73
I	5994	6363	370	13200	260466,46	1281,01
J	6558	6826	269	11400	185190,37	841,21
K	6860	7063	199	13200	128037,78	901,87

Parâmetros Adicionais

A Tabela A.2 apresenta os valores, em R\$, de custos fixos e variáveis de Bancos de Capacitores Fixos Urbanos com dados de 01/11/2000. Estes dados, utilizados para o desenvolvimento

e análise dos testes, foram gentilmente cedidos pela CPFL.

Tabela A.2: Tabela de custos de bancos de capacitores fixos

Capacidade (kVAr)	Custos Fixos (R\$)	Custos Variáveis (R\$)	Total (R\$)
150	1658,30	1937,25	3595,55
300	1658,30	2192,25	3850,55
450	1658,30	2231,25	3889,55
600	1658,30	2717,25	4375,55
900	1658,30	4462,50	6120,80
1200	1658,30	5434,50	7092,80

Além destes dados, o método LC utiliza um parâmetro de entrada (definido por orçamento disponível) que determina a quantia, em R\$, disponível para a compra, instalação e manutenção dos bancos de capacitores fixos. O custo com os capacitores é transformado para bases anuais, levando-se em consideração o período definido para amortização do investimento e uma determinada taxa de juros anual. Pode-se optar pela utilização de orçamento ilimitado, quando não se tem restrição quanto ao orçamento a ser gasto com capacitores.

O método LC também utiliza de um parâmetro que define a aplicação de uma busca local nos melhores indivíduos obtidos pelo Algoritmo Genético, caracterizando o Algoritmo Memético (Mendes et al., 2001). Este é um parâmetro de decisão do tipo sim/não (1/0, respectivamente) que determina se haverá (1), ou não (0) a aplicação de uma busca melhorada.

A.3.1 Testes para Redução de Perdas em Redes através de uma Aplicação Sequencial dos Métodos de Otimização

Inicialmente serão apresentados os resultados obtidos com a aplicação sequencial dos métodos de otimização, como ilustrado na Figura A.3. Estes resultados serão comparados os resultados obtidos pela aplicação das estratégias integradas, desenvolvidas na Seção A.2, para o mesmo conjunto de redes reais, apresentado na Tabela A.1.

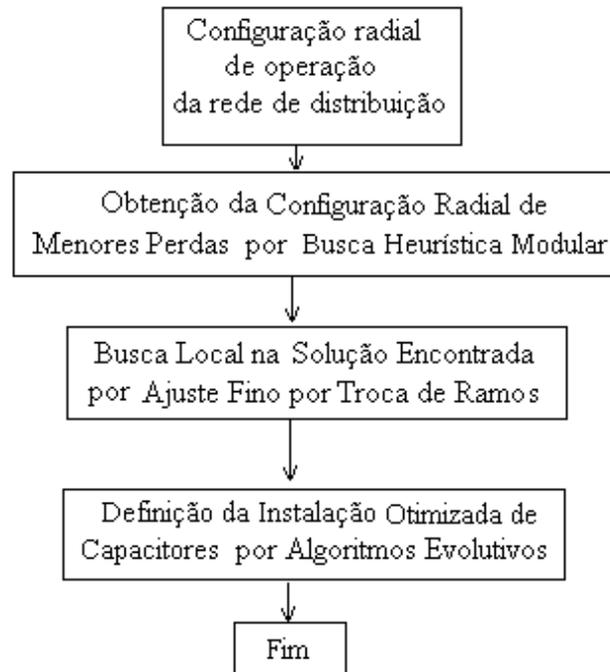


Figura A.3: Estratégia sequencial para o problema de redução de perdas em redes

Na estratégia sequencial, após a obtenção da configuração radial de menores perdas, através da aplicação do método BHM é realizada uma busca local na vizinhança dessa solução através da aplicação do método AFTR. A seguir, realiza-se uma instalação otimizada de capacitores para a configuração obtida, aplicando-se o método LC.

Os seguintes valores de parâmetros, mostrados a seguir, foram utilizados para todos os testes, cujos resultados são mostrados na Tabela A.3.

Parâmetros de reconfiguração

- Chaves com possibilidade de manobra : apenas chaves à óleo.
- N^o. de ramificações (p): 1.

Parâmetros para alocação de capacitores

- Valor do custo de energia : R\$ 300,00/MWh.

- Valor de λ : 0,85.
- Valor do orçamento disponível: R\$ 20.000,00.
- Valor dos juros anuais : 12% ao ano.
- Taxa de amortização : 5 anos.
- Opção por algoritmo memético : não.

As colunas da Tabela A.3 têm as informações descritas a seguir.

coluna 1 - A rede testada.

coluna 2 - O valor da redução de perdas, em kW, ao final da aplicação do método Reconfigurador de Redes.

coluna 3 - O valor da redução de perdas, em kW, obtida ao final da aplicação do método LC.

coluna 4 - O valor do custo anual das perdas de energia, em R\$.

coluna 5 - O valor do custo anual a ser gasto com a instalação dos capacitores, em R\$.

coluna 6 - O número de capacitores a serem instalados na rede.

coluna 7 - O lucro líquido anual, em R\$, correspondente ao ganho obtido com a redução de perdas, subtraído o custo anual de instalação de capacitores apresentado na coluna 5.

coluna 8 - O percentual de redução de perdas obtido em relação às perdas iniciais de cada rede.

coluna 9 - Os tempos computacionais obtidos para a execução de cada opção, dados em minutos e segundos (mm:ss).

Tabela A.3: Tabela de Resultados - Aplicação da Abordagem Sequencial

Rede	Perdas c/ Rec. (kW)	Perdas c/ LC (kW)	Custo anual das Perdas (R\$)	Custo anual dos Cap. (R\$)	N. de Cap.	Lucro Liq. Anual (R\$)	Red. Total (%)	Tempos Totais (mm:ss)
I34	80,31	59,74	25851,90	2854,55	7	6428,83	25,61	0,70
A	64,71	57,92	152030,63	6483,98	6	11336,23	10,49	5,82
B	146,04	123,70	324717,36	10420,48	10	48208,36	15,29	14,28
C	159,34	144,49	379296,40	11694,22	11	27284,71	20,36	1:21,02
D	159,72	144,47	379223,02	16709,72	16	23339,85	17,52	59,43
E	375,60	343,51	901724,27	19312,70	18	64911,10	14,21	3:27,72
F	663,40	601,25	1578292,14	18659,86	17	144482,35	14,00	3:33,06
G	656,36	631,74	1658306,90	19392,86	18	45241,61	8,03	13:35,42
H	1122,01	1102,52	2894122,10	19651,68	18	31509,45	2,75	7:54,16
I	1208,76	1186,33	3114123,83	19995,82	19	38873,22	7,39	18:38,02
J	831,59	814,96	2139273,10	19203,24	18	24437,07	3,12	9:28,10
K	823,07	792,15	2079381,48	19638,99	18	61529,12	12,16	8:14,81

A.3.2 Testes para Redução de Perdas em Redes através da Estratégia Unificada 1

A Tabela A.4 apresenta os resultados obtidos ao se aplicar o método identificado como Localizador de capacitores e reconfigurador de redes Estratégia 1 (LA1) nas redes especificadas na Tabela A.1. Este método adota os mesmos valores de parâmetros dos descritos no item anterior. As colunas da Tabela A.4 são análogas as da Tabela A.3, com exceção da coluna 3, que indica o valor da redução de perdas, em kW, obtida ao final do laço constituído pela aplicação dos métodos de ajuste fino por troca de ramos e localizador de capacitores.

Tabela A.4: Tabela de Resultados - Aplicação do Método LA1

Rede	Perdas c/ Rec. (kW)	Perdas c/ Laço 1 (kW)	Custo anual das Perdas (R\$)	Custo anual dos Cap. (R\$)	N. de Cap.	Lucro Liq. Anual (R\$)	Red. Total (%)	Tempos Totais (mm:ss)
A	64,71	57,84	151842,99	5840,03	5	12167,83	10,60	3,89
B	146,04	124,03	325589,90	9341,48	9	48414,81	15,07	5,27
C	159,34	142,55	374201,05	12200,01	11	31874,27	22,72	25,00
D	159,72	144,38	378991,14	13863,04	13	26418,41	18,64	37,73
E	375,60	337,91	887033,07	19942,54	18	78972,52	16,35	1:20,25
F	663,40	595,21	1562418,94	18514,22	17	160501,20	15,40	43,10
G	656,36	628,51	1649850,79	19825,62	18	53264,95	8,76	7:04,19
H	1122,01	1083,42	2843984,99	19364,12	16	99542,77	4,46	5:32,46
I	1208,76	1182,79	3104814,56	19724,90	17	48453,40	7,93	17:07,39
J	831,59	804,98	2113079,66	19825,61	18	50008,84	4,36	8:51,69
K	823,07	775,40	2035422,18	19884,25	15	105243,16	14,68	6:16,02

Pela Tabela A.4 pode-se verificar que o método LA1 forneceu melhores resultados, em relação aos resultados apresentados na Tabela A.3, tanto em termos de redução de perdas quanto em termos de lucro líquido anual. Apenas o teste com a rede B obteve uma porcentagem de redução de perdas maior em relação a porcentagem de redução de perdas obtida na Tabela A.3. No entanto, a função objetivo do processo de otimização considera o lucro líquido anual, que foi maior do que aquele apresentado na Tabela A.4.

Com estes resultados pode-se afirmar que a resolução do problema de redução de perdas em redes reais, através da aplicação de estratégia unificada mostra-se mais eficiente do que através da aplicação sequencial dos métodos de otimização.

Foi realizado mais dois grupos de testes que analisam o comportamento do método LA1, em relação a variações no parâmetro de orçamento disponível para aquisição e instalação de capacitores e variações no custo de energia. Os resultados são apresentados a seguir.

Sensibilidade ao Parâmetro *Orçamento Disponível para Gasto com Capacitores*

Para que o trabalho não se tornasse extenso, a Tabela A.5 apresenta os resultados dos testes realizados em 3 redes: C, F e K. Estes testes analisam o comportamento da estratégia unificada quando há variação no "orçamento disponível". É testado também o comportamento dessa estratégia ao agregar-se uma busca melhorada ao algoritmo genético, caracterizando o algoritmo memético.

Parâmetros de reconfiguração

- Chaves com possibilidade de manobra : apenas chaves à óleo.
- N^o. de ramificações (p): 1.

Parâmetros de localização de capacitores

- Valor do custo de energia : R\$ 200,00/MWh.
- Valor de λ : 0,85.
- Valor do orçamento disponível :
 - ▷ variando entre R\$2500,00 a R\$40000,00 com aplicação do algoritmo genético;
 - ▷ ilimitado, com opções de aplicação do algoritmo genético (ilim (1)) e de aplicação do algoritmo memético (ilim (2))².
- Valor dos juros anuais : 12% ao ano.
- Taxa de amortização : 5 anos.

As colunas da Tabela A.5 possuem as informações análogas as da Tabela A.3, com exceção da coluna 2, acrescentada para mostrar as variações de orçamentos para aquisição de capacitores.

Tabela A.5: Tabela de Resultados - Aplicação do Método LA1 - Variação do orçamento

Rede	Orçam. Dispon.	Perdas c/ Rec.	Perdas c/ Laço 1	Custo anual das Perdas (R\$)	Custo anual dos Cap. (R\$)	Nº. de Cap.	Lucro Liq. Anual (R\$)	Red. Total (%)	Tempos Totais (mm:ss)
C	2500,00	159,34	154,37	270155,29	2292,82	2	6402,11	15,3	25,60
	5000,00	"	150,83	263959,79	4369,26	4	10521,17	17,52	57,56
	10000,00	"	145,38	254417,30	6878,46	6	17554,45	20,95	1:05,43
	15000,00	"	140,89	246563,37	10386,55	9	21900,29	23,76	59,93
	ilim.(1)	"	143,08	250394,44	8890,82	8	19564,97	22,39	1:02,78
	ilim.(2)	"	132,57	232004,99	14026,56	12	32818,67	28,98	8:44,43
F	5000,00	663,40	640,18	1120316,27	4125,61	3	36514,34	8,62	38,22
	10000,00	"	613,94	1074398,96	9498,97	8	77058,31	12,57	48,34
	20000,00	"	600,82	1051427,75	19375,38	18	90153,11	14,55	2:00,25
	40000,00	"	576,09	1008159,36	33111,70	31	119685,17	18,28	1:34,13
	ilim.(1)	"	570,63	998609,99	46634,15	45	115712,10	19,10	41,84
	ilim.(2)	"	552,37	966644,29	37361,09	33	156950,85	21,85	15:15,76
K	5000,00	823,07	815,84	1427723,04	4287,70	4	8355,65	9,76	6:22,73
	10000,00	"	798,60	1397555,30	9832,69	8	32978,40	11,86	6:40,90
	15000,00	"	784,70	1373216,90	14084,61	12	53064,88	13,39	9:35,79
	20000,00	"	762,75	1334815,81	33270,23	29	72280,35	16,21	15:48,46
	ilim.(1)	"	761,34	1332351,24	34252,89	30	73762,26	22,23	17:29,04
	ilim.(2)	"	743,63	1301344,07	50585,55	41	88436,77	18,54	269:29,25

Pode-se verificar pelos resultados apresentados na Tabela A.5 que aumentando-se o valor do orçamento disponível para gastos com capacitores, há uma melhora redução das perdas obtida pela aplicação da primeira estratégia unificada. Pode-se observar também que o lucro líquido anual aumentou consideravelmente. O custo do aumento do número de capacitores é compensado pela redução das perdas.

Pode ser observado, pelos resultados obtidos na Tabela A.5, que as menores porcentagens de redução de perdas foram obtidas na opção de orçamento ilimitado com aplicação do algoritmo memético (ilim(2)). No entanto, os tempos computacionais gastos com a aplicação do algoritmo memético foram bem maiores do que os tempos computacionais para a aplicação do algoritmo genético (ilim(1)).

²os testes envolvendo a aplicação do método LA1 com opção de algoritmo memético e variação no orçamento disponível serão analisados na Seção A.3.3

Sensibilidade ao Parâmetro *Custo de Energia*

Foram também realizados testes com as redes C, F e K, para análise do comportamento da primeira estratégia unificada sob variações do parâmetro "custo de energia". Os resultados estão apresentados da Tabela A.6, com informações análogas as apresentadas na Tabela A.3 — com exceção da coluna 2, que registra informações sobre o custo de energia, utilizados em cada um dos testes.

Tabela A.6: Tabela de Resultados - Aplicação do Método LA1 - Variação do custo de energia

Rede	Valor da Energia (R\$)	Perdas c/ Rec. (kW)	Perdas c/ Laço 1 (kW)	Custo anual das Perdas (R\$)	Custo anual dos Cap. (R\$)	Nº. de Cap.	Lucro Liq. Anual (R\$)	Red. Total (%)	Tempos Totais (mm:ss)
C	50,00	159,34	143,68	62858,72	4855,28	4	1998,55	22,01	6:29,94
	100,00	"	134,32	117528,94	11163,01	8	10733,16	27,89	6:14,87
	150,00	"	132,93	174468,11	13241,32	10	21428,23	28,76	8:13,34
	200,00	"	132,57	232004,99	14026,56	12	32818,67	28,98	8:44,43
	250,00	"	131,68	288042,77	15642,97	13	44877,03	29,55	7:21,88
	300,00	"	131,81	346010,10	15968,18	14	56297,05	29,46	8:39,71
F	50,00	663,40	605,44	264878,61	8745,18	8	16615,27	13,85	50,97
	100,00	"	582,06	509303,94	20944,35	19	50229,82	17,38	44,71
	150,00	"	577,88	758466,63	27905,63	26	84344,92	18,01	39,22
	200,00	"	570,63	998609,99	46634,15	45	115712,10	19,10	43,84
	250,00	"	568,70	1244029,67	45630,05	44	161535,56	19,39	50,03
	300,00	"	568,81	1493121,28	51214,39	50	197098,68	19,38	40,32
K	50,00	823,07	801,86	350814,95	5058,97	4	4217,68	11,46	8:18,78
	100,00	"	778,01	680756,52	16533,88	14	22892,79	17,89	7:47,30
	150,00	"	770,45	1011218,20	24096,86	21	44959,72	15,28	7:55,27
	200,00	"	761,34	1332351,24	34252,89	30	73762,26	22,23	11:29,04
	250,00	"	755,82	1653361,47	38249,49	32	108847,02	23,00	11:34,77
	300,00	"	756,12	1984803,61	49670,57	45	126075,41	17,02	9:20,22

Pode-se verificar pelos resultados apresentados na Tabela A.6 que, com o aumento do custo de energia, houve uma redução crescente das perdas. Isto pode ser explicado pelo fato de que, com um custo de energia mais alto, a instalação de um número considerável de capacitores é compensada pela economia gerada na redução de perdas.

Verifica-se, ainda, que não há variação significativa nos valores de redução das perdas para a rede C a partir de R\$ 150,00/MWh. Contudo, o lucro líquido anual tornou-se crescente, pois mesmo obtendo-se menores reduções incrementais de perdas, o custo crescente da energia gerou lucros líquidos crescentes.

É bom salientar que houve um comportamento ligeiramente diferente do esperado, nos resultados das 3 redes estudadas, quando o custo da energia passou de R\$ 250,00/MWh para R\$ 300,00/MWh. Com o custo da energia maior, seria natural supor que a metodologia de instalação de capacitores “forçasse” uma redução mais significativa das perdas. No entanto, a redução das perdas com o custo da energia a R\$ 300,00/MWh foi de até 0,09 de ponto percentual menor do que a redução de perdas com o custo de energia a R\$ 250,00/MWh. Este fenômeno está relacionado com a aleatoriedade do algoritmo genético. Como são dois problemas com características distintas, a busca genética pelo espaço de soluções se deu por caminhos diferentes.

A.3.3 Testes para Redução de Perdas em Redes através da Estratégia Unificada 2

Nesta seção será apresentada uma comparação dos resultados obtidos com a aplicação do método LA1 e o método identificado como Localizador de capacitores e reconfigurador de redes Estratégia 2 (LA2). Serão analisadas também a aplicação das opções de algoritmos genético e memético. As combinações destes métodos serão aplicadas nas redes C, F e K.

Para estudos em planejamentos de redes, utilizou-se um parâmetro adicional que limita o número máximo de capacitores a serem instalados nas redes. Os estudos de casos, cujos resultados são apresentados nas Tabelas A.7 até A.14, levam em consideração este parâmetro, além das variações do parâmetro de “orçamento disponível”.

As linhas das Tabelas A.7 a A.14 têm as informações descritas a seguir.

linha 1 - O valor da redução de perdas, em kW, após a aplicação da BHM.

linha 2 - O valor da redução de perdas, em kW, após a aplicação do AFTR, para o método LA1 e após a aplicação do LC, para o método LA2.

linha 3 - O valor da redução de perdas, em kW, após a aplicação do LC, para o método LA1 e após a aplicação do AFTR, para o método LA2.

linha 4 - A redução de perdas, em kW, após o término da execução de cada um dos laços.

linha 5 - O custo total com a redução de perdas obtida, em R\$.

linha 6 - O custo total dos capacitores a serem instalados, em R\$.

linha 7 - O número de capacitores a serem instalados, com o devido valor de capacidade total a ser instalada em KVAR (valor entre os parêntesis).

linha 8 - O valor do lucro líquido anual obtido, em R\$, ao se instalarem os capacitores sugeridos.

Valor do parâmetro de limitação do número de capacitores

- Poderão ser instalados, no máximo, 15 capacitores para os testes com a rede C. Este valor foi definido considerando-se que, dentre as redes da Tabela A.1, C pode ser "classificada" como uma rede real de "pequeno porte".
- Poderão ser instalados, no máximo, 40 capacitores para os testes com cada uma das redes F e K. Este valor foi definido considerando-se que, dentre as redes da Tabela A.1, F e K podem ser "classificadas" como redes reais de "maior porte".

Tabela A.7: Rede C - Perdas iniciais: 181,45 kW; orçamento: ilimitado

Método LA1	Alg. Gen.	Alg. Mem.	Método LA2	Alg. Gen.	Alg. Mem.
Sol. BHM (kW)	159,34	159,34	Sol. BHM (kW)	159,34	159,34
Sol. AFTR (kW)	159,34	159,34	Sol. LC (kW)	141,01	133,71
Sol. LC (kW)	137,74	133,71	Sol. AFTR (kW)	141,01	133,71
Sol. Final (kW)	137,74	133,71	Sol. Final (kW)	137,74	133,71
Custo das Perdas(R\$)	241.051,26	233.995,34	Custo das Perdas(R\$)	241.051,26	233.995,34
Custo dos Cap. (R\$)	13.668,49	12.702,04	Custo dos Cap. (R\$)	13.668,49	12.702,04
Nº de Cap. (KVar)	12 (4650)	10 (6250)	Nº de Cap. (KVar)	12 (4650)	10 (6250)
Lucro Líq. (R\$)	24.130,46	32.152,83	Lucro Líq. (R\$)	24.130,46	32.152,83

Tabela A.8: Rede C - Perdas iniciais: 181,45 kW; orçamento: R\$ 15.000,00

Método LA1	Alg. Gen.	Alg. Mem.	Método LA2	Alg. Gen.	Alg. Mem.
Sol. BHM (kW)	159,34	159,34	Sol. BHM (kW)	159,34	159,34
Sol. AFTR (kW)	159,34	159,34	Sol. LC (kW)	146,00	136,36
Sol. LC (kW)	146,00	136,36	Sol. AFTR (kW)	146,00	136,36
Sol. Final (kW)	141,53	133,43	Sol. Final (kW)	141,53	133,43
Custo das Perdas(R\$)	247.688,82	233.502,27	Custo das Perdas(R\$)	247.688,82	233.502,27
Custo dos Cap. (R\$)	8.331,75	12.715,34	Custo dos Cap. (R\$)	8.331,75	12.715,34
Nº de Cap. (KVar)	7 (3150)	9 (6300)	Nº de Cap.(KVar)	7 (3150)	9 (6300)
Lucro Líq. (R\$)	22.849,64	32.632,60	Lucro Líq. (R\$)	22.849,64	32.632,60

Tabela A.9: Rede F - Perdas iniciais: 699,16 kW; orçamento: ilimitado

Método LA1	Alg. Gen.	Alg. Mem.	Método LA2	Alg. Gen.	Alg. Mem.
Sol. BHM (kW)	663,62	663,62	Sol. BHM (kW)	663,62	663,62
Sol. AFTR (kW)	663,40	663,40	Sol. LC (kW)	581,63	552,47
Sol. LC (kW)	580,25	551,99	Sol. AFTR (kW)	581,41	552,24
Sol. Final (kW)	572,52	552,24	Sol. Final (kW)	571,49	552,23
Custo das Perdas(R\$)	1.001.908,00	966.415,39	Custo das Perdas(R\$)	1.000.106,74	967.276,72
Custo dos Cap. (R\$)	40.656,17	39.137,30	Custo dos Cap. (R\$)	37.501,76	36.675,74
Nº de Cap. (KVar)	39 (10200)	35 (15750)	Nº de Cap. (KVar)	35 (10500)	32 (15300)
Lucro Líq. (R\$)	118.392,06	155.403,54	Lucro Líq. (R\$)	123.733,95	157.389,99

Tabela A.10: Rede F - Perdas iniciais: 699,16 kW; orçamento: R\$ 20.000,00

Método LA1	Alg. Gen.	Alg. Mem.	Método LA2	Alg. Gen.	Alg. Mem.
Sol. BHM (kW)	663,62	663,62	Sol. BHM (kW)	663,62	663,62
Sol. AFTR (kW)	663,40	663,40	Sol. LC (kW)	603,94	594,94
Sol. LC (kW)	603,72	594,72	Sol. AFTR (kW)	603,72	594,72
Sol. Final (kW)	595,39	584,85	Sol. Final (kW)	594,32	578,88
Custo-Perdas(R\$)	1.041.932,31	1.023.494,19	Custo-Perdas(R\$)	1.040.064,71	1.013.041,29
Custo-Cap. (R\$)	17.545,07	19.937,33	Custo-Cap. (R\$)	6.947,93	19.877,41
Nº de Cap. (KVAR)	16 (5400)	17 (8700)	Nº de Cap.(KVAR)	15 (5700)	17 (8700)
Lucro Líq. (R\$)	101.478,85	117.524,72	Lucro Líq. (R\$)	101.329,80	128.423,75

Tabela A.11: Rede F - Perdas iniciais: 699,16 kW; orçamento: R\$ 40.000,00

Método LA1	Alg. Gen.	Alg. Mem.	Método LA2	Alg. Gen.	Alg. Mem.
Sol. BHM (kW)	663,62	663,62	Sol. BHM (kW)	663,62	663,62
Sol. AFTR (kW)	663,40	663,40	Sol. LC (kW)	604,49	592,71
Sol. LC (kW)	587,92	573,11	Sol. AFTR (kW)	604,27	592,49
Sol. Final (kW)	579,53	553,11	Sol. Final (kW)	583,86	554,34
Custo das Perdas(R\$)	1.014.173,81	969.198,68	Custo das Perdas(R\$)	1.021.750,60	970.087,04
Custo dos Cap. (R\$)	35.870,16	36.043,41	Custo dos Cap. (R\$)	36.903,39	36.831,99
Nº de Cap. (KVAR)	34 (9150)	29 (15450)	Nº de Cap. (KVAR)	35 (8850)	32 (14550)
Lucro Líq. (R\$)	110.912,26	155.714,14	Lucro Líq. (R\$)	102.688,46	154.423,33

Tabela A.12: Rede K - Perdas iniciais: 901,87 kW; orçamento: ilimitado

Método LA1	Alg. Gen.	Alg. Mem.	Método LA2	Alg. Gen.	Alg. Mem.
Sol. BHM (kW)	837,14	837,14	Sol. BHM (kW)	837,14	837,14
Sol. AFTR (kW)	823,07	823,07	Sol. LC (kW)	777,88	757,15
Sol. LC (kW)	767,06	743,94	Sol. AFTR (kW)	761,98	739,58
Sol. Final (kW)	762,27	741,41	Sol. Final (kW)	759,23	736,82
Custo-Perdas(R\$)	1.324.723,92	1.300.965,21	Custo-Perdas(R\$)	1.328.660,05	1.289.428,71
Custo-Cap. (R\$)	37.279,78	46.948,26	Custo-Cap. (R\$)	34.454,73	49.504,68
Nº de Cap. (KVAR)	35 (11400)	39 (22350)	Nº de Cap. (KVAR)	32 (11550)	40 (23100)
Lucro Líq. (R\$)	60.362,69	92.452,92	Lucro Líq. (R\$)	101.874,10	126.055,50

Tabela A.13: Rede K - Perdas iniciais: 901,87 kW; orçamento: R\$ 20.000,00

Método LA1	Alg. Gen.	Alg. Mem.	Método LA2	Alg. Gen.	Alg. Mem.
Sol. BHM (kW)	837,14	837,14	Sol. BHM (kW)	837,14	837,14
Sol. AFTR (kW)	823,07	823,07	Sol. LC (kW)	805,22	799,79
Sol. LC (kW)	786,39	780,84	Sol. AFTR (kW)	796,07	783,64
Sol. Final (kW)	777,94	777,43	Sol. Final (kW)	778,89	776,28
Custo-Perdas(R\$)	1.361.387,63	1.360.507,51	Custo-Perdas(R\$)	1.363.058,38	1.358.486,21
Custo-Cap. (R\$)	19.884,24	19.974,14	Custo-Cap. (R\$)	19.984,56	19.972,27
Nº de Cap.(KVAr)	15 (9150)	16 (9600)	Nº de Cap.(KVAr)	17 (8100)	16 (9150)
Lucro Líq. (R\$)	59.094,51	59.884,74	Lucro Líq. (R\$)	81.945,95	86.530,42

Tabela A.14: Rede K - Perdas iniciais: 901,87 kW; orçamento: R\$ 40.000,00

Método LA1	Alg. Gen.	Alg. Mem.	Método LA2	Alg. Gen.	Alg. Mem.
Sol. BHM (kW)	837,14	837,14	Sol. BHM (kW)	837,14	837,14
Sol. AFTR (kW)	823,07	823,07	Sol. LC (kW)	784,33	769,98
Sol. LC (kW)	773,94	762,23	Sol. AFTR (kW)	770,12	753,68
Sol. Final (kW)	769,90	751,46	Sol. Final (kW)	759,07	746,92
Custo-Perdas(R\$)	1.347.322,37	1.315.050,02	Custo-Perdas(R\$)	1.328.371,55	1.307.117,45
Custo-Cap. (R\$)	30.308,30	39.911,47	Custo-Cap. (R\$)	32.099,25	39.959,71
Nº de Cap. (KVAr)	28 (9900)	33 (18300)	Nº de Cap. (KVAr)	27 (13350)	31 (18900)
Lucro Líq. (R\$)	62.735,71	85.404,90	Lucro Líq. (R\$)	104.518,09	117.911,73

Observando-se os resultados das Tabelas A.7 a A.14, pode-se perceber que, na maioria dos testes, o método LA2 com a opção de algoritmo memético forneceu os melhores resultados tanto de redução de perdas quanto de lucro líquido anual. No entanto, o teste com a rede F e orçamento disponível de R\$ 40.000,00 não seguiu a mesma tendência. O valor da redução de perdas obtido pelo método LA2 ficou 0,02 de ponto percentual acima do valor da redução de perdas obtida pelo método LA1, com a opção de algoritmo memético. Além disso, houve um gasto anual maior com os 32 capacitores instalados, se comparados ao gasto anual com a instalação dos 29 capacitores sugeridos pelo método LA1 com opção de algoritmo memético. Isto pode ser explicado: como os algoritmos memético e genético utilizam aleatoriedade em seus procedimentos, a busca no espaço de soluções tomou caminhos diferentes levando à soluções de mínimos locais também diferentes. No entanto, esses aspectos foram resolvidos com refinamentos nos processos de busca (Mendes et al., 2002).

Foi realizado mais um grupo de testes para analisar o comportamento das estratégias integradas, quando restringe-se demasiadamente o orçamento disponível para o gasto com capacitores. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas A.15 a A.17.

Tabela A.15: Rede C - Perdas iniciais: 181,45 kW; orçamento: R\$ 1.500,00

Método LA1	Alg. Gen.	Alg. Mem.	Método LA2	Alg. Gen.	Alg. Mem.
Sol. BHM (kW)	159,34	159,34	Sol. BHM (kW)	159,34	159,34
Sol. AFTR (kW)	59,34	159,34	Sol. LC (kW)	158,09	157,84
Sol. LC (kW)	158,09	157,84	Sol. AFTR (kW)	158,09	157,84
Sol. Final (kW)	156,28	155,60	Sol. Final (kW)	156,28	155,60
Custo das Perdas(R\$)	273.487,65	272.295,18	Custo das Perdas(R\$)	273.487,65	272.295,18
Custo dos Cap. (R\$)	1.213,82	1.213,82	Custo dos Cap. (R\$)	1.213,82	1.213,82
Nº de Cap. (KVar)	1 (600)	1 (600)	Nº de Cap. (KVar)	1 (600)	1 (600)
Lucro Líq. (R\$)	4.148,74	5.341,21	Lucro Líq. (R\$)	4.148,74	5.341,21

Tabela A.16: Rede F - Perdas iniciais: 699,16 kW; orçamento: R\$ 3.500,00

Método LA1	Alg. Gen.	Alg. Mem.	Método LA2	Alg. Gen.	Alg. Mem.
Sol. BHM (kW)	663,62	663,62	Sol. BHM (kW)	663,62	663,62
Sol. AFTR (kW)	663,40	663,40	Sol. LC (kW)	654,41	638,47
Sol. LC (kW)	654,19	638,25	Sol. AFTR (kW)	654,19	638,25
Sol. Final (kW)	653,82	634,53	Sol. Final (kW)	653,82	634,53
Custo-Perdas(R\$)	1.144.179,89	1.110.434,71	Custo-Perdas(R\$)	1.144.179,89	1.110.434,71
Custo-Cap. (R\$)	3.237,00	3.506,64	Custo-Cap. (R\$)	3.237,00	3.506,64
Nº de Cap. (KVar)	3 (1350)	3 (1650)	Nº de Cap. (KVar)	3 (1350)	3 (1650)
Lucro Líquido (R\$)	13.539,35	47.014,89	Lucro Líquido (R\$)	13.925,57	47.401,10

Tabela A.17: Rede K - Perdas iniciais: 901,87 kW; orçamento: R\$ 4.000,00

Método LA1	Alg. Gen.	Alg. Mem.	Método LA2	Alg. Gen.	Alg. Mem.
Sol. BHM (kW)	837,14	837,14	Sol. BHM (kW)	837,14	837,14
Sol. AFTR (kW)	823,07	832,14	Sol. LC (kW)	830,70	832,85
Sol. LC (kW)	815,38	818,78	Sol. AFTR (kW)	816,69	818,78
Sol. Final (kW)	815,06	814,55	Sol. Final (kW)	812,30	814,55
Custo-Perdas(R\$)	1.426.352,97	1.428.718,63	Custo-Perdas(R\$)	1.421.529,68	1.425.454,90
Custo-Cap. (R\$)	3.989,76	3.989,76	Custo-Cap. (R\$)	3.237,00	3.989,76
Nº de Cap. (KVar)	4 (600)	4 (600)	Nº de Cap. (KVar)	3 (1350)	4 (600)
Lucro Líq. (R\$)	10.023,66	7.658,00	Lucro Líq. (R\$)	40.222,21	35.544,23

Observando os resultados apresentados nas Tabelas A.15 a A.17, pode-se perceber que o método LA2 com a opção de algoritmo memético também obteve os melhores resultados, tanto em termos de redução de perdas quanto em termos de lucro líquido anual.

Como último teste, aplicou-se o método LA2 em uma rede de pequeno porte (aqui denominada Rede135) com 135 nós. Esta rede foi utilizada no trabalho de Gallego e co-autores³ (2001). Suas características estão detalhadas nas Tabelas A.20 e A.21. Considera-se valores de tensão base de 13800 V e potência base de 10000 kVA. O valor do carregamento total é de 5436,76kW e o valor de perdas associadas à configuração inicial é igual a 117,73 kW — para obtenção de referências monetárias, usou-se o fator de carga FC=0,6.

³agradeço ao Prof. Rubén Romero, um dos autores do trabalho, a gentileza de fornecer esses dados

Os resultados estão apresentados da Tabela A.18, com informações e valores de parâmetros análogos aos apresentados na Tabela A.3. Para a obtenção destes resultados, utilizou-se uma máquina *Pentium 4* com 2.2 Ghz e 1.0Ghz de memória *RAM*.

Tabela A.18: Tabela de Resultados - Aplicação do Método LA2 - Rede135

Valor do Orçam.	Perdas c/ Rec. (kW)	Perdas c/ Laço 2 (kW)	Custo anual das Perdas (R\$)	Custo anual dos Cap. (R\$)	N. de Cap.	Lucro Liq. Anual (R\$)	Red. Total (%)	Tempos Totais (R\$) (mm:ss)
10000,00(1)	112,39	100,65	176138,92	8155,85	17	21723,63	14,50	0,94

A Tabela A.19 ilustra a localização e a capacidade dos capacitores que devem ser instalados na rede135, cuja redução de perdas é apresentada na Tabela A.18.

Tabela A.19: Localização e capacidade dos capacitores a serem instalados na Rede135

Localização (Nó)	Capacidade (kVAr)
7	300
17	300
20	300
33	300
42	300
43	300
56	300
57	300
69	300
87	300
125	300
130	300
136	600
155	900
157	300
219	300
221	300

A.4 Conclusões

Observando-se os resultados apresentados nas Tabelas A.4 a A.17, pode-se concluir que a segunda estratégia unificada desenvolvida neste trabalho possibilitou melhor qualidade nas reduções de perdas obtidas. Neste caso, o laço de realimentação em que se aplica o procedimento de troca de ramos em configurações com perdas reduzidas por compensação de reativos na rede (obtidas pela instalação otimizada de capacitores), realmente exerceu sua função. O laço promoveu os ajustes sucessivos obtendo refinamentos nas soluções. Assim, pode-se concluir que a segunda estratégia unificada, dentre as duas estratégias de unificação apresentadas neste apêndice, é a melhor alternativa para redução de perdas por reconfigurações e instalação de capacitores em redes de distribuição de energia elétrica.

Como sugestão para utilização do método LA2 para redução de perdas em redes reais de distribuição de energia elétrica, deve-se inicialmente aplicar a estratégia com a opção de algoritmos genéticos, em todos os testes. Esta opção apresenta bons resultados e requer tempos computacionais menores. Após a identificação dos testes de maior interesse, deve-se aplicar o método LA2 com a opção de algoritmos meméticos. Em geral, a alternativa com algoritmos meméticos leva a melhores soluções.

Para testes em que se dispõe de orçamentos muito limitados deve-se realizar, primeiramente, estudos envolvendo orçamentos ilimitados para a obtenção de indicadores que mostrem a capacidade de retorno de investimentos.

O Apêndice B contém uma cópia do trabalho *An Evolutionary Approach for Capacitor Placement in Distribution Networks* de (Mendes et al., 2002) que apresenta em detalhes o método de Localização de Capacitores, utilizando algoritmos genéticos e meméticos, requerido nas abordagens desenvolvidas no Apêndice A.

Tabela A.20: Especificidades dos nós do sistema de distribuição Rede135

No. do nó	P (kW)	Q (kVAr)	No. do nó	P (kW)	Q (kVAr)	No. do nó	P (kW)	Q (kVAr)	No. do nó	P (kW)	Q (kVAr)
100	0.0	0.0	051	0.0	0.0	131	247.750	105.025	212	145.475	71.121
001	0.0	0.0	052	117.880	49.971	133	0.0	0.0	214	21.369	10.447
002	47.780	19.009	053	62.668	26.566	134	89.878	38.101	215	74.789	36.564
003	42.551	16.929	054	172.285	73.034	135	1137.280	482.108	217	227.926	111.431
004	87.022	34.622	055	458.556	194.388	136	458.339	194.296	218	35.614	17.411
005	311.310	123.855	056	262.962	111.473	137	385.197	163.290	219	249.295	121.877
006	148.869	59.228	057	235.761	99.942	138	0.0	0.0	220	316.722	154.842
007	238.672	94.956	058	0.0	0.0	139	79.608	33.747	221	333.817	163.199
009	62.299	24.786	059	109.215	46.298	141	87.312	37.013	222	249.295	121.877
010	124.598	49.571	061	0.0	0.0	142	0.0	0.0	223	0.0	0.0
012	140.175	55.768	062	72.809	30.865	143	74.001	31.370			
013	116.813	46.474	063	258.473	109.570	144	232.050	98.369			
015	249.203	99.145	064	69.169	29.322	145	141.819	60.119			
017	291.447	115.952	065	21.843	9.260	146	0.0	0.0			
018	303.720	120.835	067	0.0	0.0	147	76.449	32.408			
020	215.396	85.695	068	20.527	8.702	148	0.0	0.0			
021	198.586	79.007	069	150.548	63.819	149	51.322	21.756			
024	0.0	0.0	070	220.687	93.552	150	59.874	25.381			
025	0.0	0.0	071	92.384	39.163	152	9.065	3.843			
026	0.0	0.0	072	0.0	0.0	153	2.092	0.887			
027	30.127	14.729	073	226.693	96.098	154	16.735	7.094			
028	230.972	112.920	075	0.0	0.0	155	1506.522	638.634			
029	60.256	29.458	076	294.016	116.974	156	313.023	132.694			
030	230.972	112.920	077	83.015	33.028	157	79.831	33.842			
032	120.507	58.915	078	83.015	33.028	158	51.322	21.756			
033	0.0	0.0	080	103.770	41.285	159	0.0	0.0			
034	56.981	27.857	081	176.408	70.184	160	202.435	85.815			
035	364.665	178.281	082	83.015	33.028	162	60.823	25.784			
036	0.0	0.0	083	217.917	86.698	163	45.618	19.338			
037	124.647	60.939	084	23.294	9.267	164	0.0	0.0			
038	56.981	27.857	085	5.075	2.019	200	157.070	66.584			
039	0.0	0.0	086	72.638	28.899	201	0.0	0.0			
040	85.473	41.787	087	405.990	161.523	202	250.148	106.041			
041	0.0	0.0	121	0.0	0.0	203	0.0	0.0			
042	396.735	193.960	122	100.182	42.468	204	69.809	29.593			
043	0.0	0.0	123	142.523	60.417	205	32.072	13.596			
044	181.152	88.563	124	96.042	40.713	206	61.084	25.894			
045	242.172	118.395	125	300.454	127.366	207	0.0	0.0			
046	75.316	36.821	127	141.238	59.873	208	94.622	46.260			
048	0.0	0.0	128	279.847	118.631	209	49.858	24.375			
049	1.254	0.531	129	87.312	37.013	210	123.164	60.214			
050	6.274	2.660	130	243.849	103.371	211	78.350	38.304			

Tabela A.21: Especificidades das chaves do sistema de distribuição Rede135

Nó Inicial	Nó Final	r (Ohm)	y (Ohm)	Estado Inicial
100	001	0.33205	0.76653	1
001	002	0.00188	0.00433	1
002	003	0.22324	0.51535	1
003	004	0.09943	0.22953	1
004	005	0.15571	0.35945	1
005	006	0.16321	0.37677	1
006	007	0.11444	0.26417	1
006	009	0.05675	0.05666	1
009	010	0.52124	0.27418	1
009	012	0.10877	0.10860	1
012	013	0.39803	0.20937	1
012	015	0.91744	0.31469	1
012	017	0.11823	0.11805	1
017	018	0.50228	0.26421	1
017	020	0.05675	0.05666	1
020	021	0.29379	0.15454	1
100	024	0.33205	0.76653	1
024	025	0.00188	0.00433	1
025	026	0.22324	0.51535	1
026	027	0.10881	0.25118	1
027	028	0.71078	0.37388	1
027	029	0.18197	0.42008	1
029	030	0.30326	0.15952	1
029	032	0.02439	0.05630	1
032	033	0.04502	0.10394	1
033	034	0.01876	0.04331	1
034	035	0.11823	0.11805	1
035	036	0.02365	0.02361	1
036	037	0.18954	0.09970	1
037	038	0.39803	0.20937	1
036	039	0.05675	0.05666	1
039	040	0.09477	0.04985	1
040	041	0.41699	0.21934	1
041	042	0.11372	0.05982	1
039	043	0.07566	0.07555	1
043	044	0.36960	0.19442	1
044	045	0.26536	0.13958	1
043	046	0.05675	0.05666	1
100	048	0.33205	0.76653	1
048	049	0.11819	0.27283	1
049	050	2.96288	1.01628	1
049	051	0.00188	0.00433	1
051	052	0.06941	0.16024	1
052	053	0.81502	0.42872	1
052	054	0.06378	0.14724	1
054	055	0.13132	0.30315	1
055	056	0.06191	0.14291	1
056	057	0.11444	0.26417	1
057	058	0.28374	0.28331	1
058	059	0.28374	0.28331	1
057	061	0.04502	0.10394	1

Nó Inicial	Nó Final	r (Ohm)	y (Ohm)	Estado Inicial
061	062	0.02626	0.06063	1
062	063	0.06003	0.13858	1
063	064	0.03002	0.06929	1
064	065	0.02064	0.04764	1
062	067	0.10881	0.25118	1
067	068	0.25588	0.13460	1
068	069	0.41699	0.21934	1
069	070	0.50228	0.26421	1
070	071	0.33170	0.17448	1
071	072	0.20849	0.10967	1
056	073	0.13882	0.32047	1
100	075	0.00750	0.01732	1
075	076	0.27014	0.62362	1
076	077	0.38270	0.88346	1
077	078	0.33018	0.76220	1
078	080	0.32830	0.75787	1
080	081	0.17072	0.39409	1
081	082	0.55914	0.29412	1
081	083	0.05816	0.13425	1
083	084	0.70130	0.36890	1
084	085	1.02352	0.53839	1
083	086	0.06754	0.15591	1
086	087	1.32352	0.45397	1
100	121	0.01126	0.02598	1
121	122	0.72976	1.68464	1
122	123	0.22512	0.51968	1
123	124	0.20824	0.48071	1
124	125	0.04690	0.10827	1
125	127	0.61950	0.61857	1
127	128	0.34049	0.33998	1
128	129	0.56862	0.29911	1
128	130	0.10877	0.10860	1
130	131	0.56862	0.29911	1
100	133	0.01126	0.02598	1
133	134	0.41835	0.96575	1
134	135	0.10499	0.13641	1
134	136	0.43898	1.01338	1
136	137	0.07520	0.02579	1
137	138	0.07692	0.17756	1
138	139	0.33205	0.76653	1
139	141	0.08442	0.19488	1
141	142	0.13320	0.30748	1
142	143	0.29320	0.29276	1
143	144	0.21753	0.21721	1
144	145	0.26482	0.26443	1
142	146	0.10318	0.23819	1
146	147	0.13507	0.31181	1
100	148	0.00938	0.02165	1
148	149	0.16884	0.38976	1
149	150	0.11819	0.27283	1
150	152	2.28608	0.78414	1
150	153	0.45587	1.05236	1
153	154	0.69600	1.60669	1

Nó Inicial	Nó Final	r (Ohm)	y (Ohm)	Estado Inicial
154	155	0.45774	1.05669	1
155	156	0.20298	0.26373	1
156	157	0.21348	0.27737	1
157	158	0.54967	0.28914	1
158	159	0.54019	0.28415	1
157	160	0.04550	0.05911	1
160	162	0.47385	0.24926	1
162	163	0.86241	0.45364	1
163	164	0.56862	0.29911	1
158	200	0.77711	0.40878	1
200	201	1.08038	0.56830	1
159	202	1.09933	0.57827	1
202	203	0.47385	0.24926	1
154	204	0.32267	0.74488	1
204	205	0.14633	0.33779	1
205	206	0.12382	0.28583	1
100	207	0.01126	0.02598	1
207	208	0.64910	1.49842	1
208	209	0.04502	0.10394	1
209	210	0.52640	0.18056	1
209	211	0.02064	0.04764	1
211	212	0.53071	0.27917	1
211	214	0.09755	0.22520	1
214	215	0.11819	0.27283	1
214	217	0.13882	0.32047	1
217	218	0.04315	0.09961	1
218	219	0.09192	0.21220	1
219	220	0.16134	0.37244	1
220	221	0.37832	0.37775	1
221	222	0.39724	0.39664	1
222	223	0.29320	0.29276	1
7	86	0.13132	0.30315	0
10	32	0.26536	0.13958	0
20	130	0.14187	0.14166	0
46	223	0.08512	0.08499	0
33	61	0.04502	0.10394	0
59	145	0.14187	0.14166	0
65	147	0.14187	0.14166	0
73	206	0.03940	0.09094	0
78	125	0.12944	0.29882	0
125	219	0.01688	0.03898	0
131	223	0.33170	0.17448	0
139	154	0.14187	0.14166	0
138	217	0.07692	0.17756	0
138	153	0.07692	0.17756	0
141	154	0.07692	0.17756	0
141	220	0.07692	0.17756	0
145	206	0.26482	0.26443	0
160	56	0.49696	0.64567	0
212	122	0.17059	0.08973	0
215	123	0.05253	0.12126	0
223	147	0.29320	0.29276	0

Apêndice B

Publicações Vinculadas ao Trabalho

- Lyra, C.; Pissarra, C.; Cavellucci, C. (2000);
"Redução de Perdas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica", Anais do XIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA) - Florianópolis, SC - vol. 01 - pp. 998-1003.
- Lyra, C.; Pissarra, C.; Cavellucci, C. (2002);
"Perspectiva "Zoom" para Redução de Perdas na Distribuição de Energia Elétrica", Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automática (CBA) - Natal, RN - pp. 874-882.
- Mendes, A.; Pissarra, C.; Lyra, C.; França, P.; Cavellucci, C. (2002);
"Instalação de Capacitores para Redução de Perdas em Redes de Distribuição de Energia Elétrica", Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automática (CBA) - Natal, RN - pp. 867-873.
- Manhães, R.; Lyra, C.; Pissarra, C.; Cavellucci, C. (2002);
"Reconfiguração de Redes para Redução das Perdas Técnicas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica", Anais do XV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (SENDI) - Salvador, BA - 11 pp.

- Mendes, A.; França, P.; Lyra, C.; Pissarra, C.; Cavellucci, C. (2002);
"An Evolutionary Approach for Capacitor Placement in Distribution Networks", Proceedings of the Third International NAISO Symposium on Engineering of Intelligent Systems (EIS 2002) - Malaga, Spain - 6 pp.
- Lyra, C.; Pissarra, C.; Cavellucci, C. (2003);
"Informed Searches Uncover Paths to Enhance Energy Output in Power Distribution Networks", to appear on Proceedings of the 12th Intelligent Systems Application to Power Systems (ISAP 2003) - Lemnos, Greece - 6 pp.

Apêndice C

Anexo

Este apêndice contém uma cópia do trabalho “*An Evolutionary Approach for Capacitor Placement in Distribution Networks*” de Alexandre Mendes, Paulo França, Christiano Lyra, Cristiane Pissarra e Celso Cavellucci. Este trabalho descreve o método de localização e dimensionamento de capacitores (LC) utilizando algoritmos genéticos e meméticos; foi publicado nos anais do *Proceedings of the Third International NAISO Symposium on Engineering of Intelligent Systems (EIS 2002)* realizado em Malaga, Espanha, em setembro de 2002.

AN EVOLUTIONARY APPROACH FOR CAPACITOR PLACEMENT IN DISTRIBUTION NETWORKS

[‡]ALEXANDRE MENDES, [‡]PAULO M. FRANÇA, [‡]CHRISTIANO LYRA,
[‡]CRISTIANE PISSARRA AND [†]CELSO CAVELUCCI

[‡]*Departamento de Engenharia de Sistemas*
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - UNICAMP
C.P. 6101 - 13083-970 Campinas SP - Brazil
E-mails: {smendes, franca, christi, pissarra}@densis.fee.unicamp.br

[†]*THOTH Consultoria*
R. Prof. Dr. Edgard Atra 644 - 13105-666 Campinas SP - Brazil
E-mail: celso@toth.com.br

Abstract – The Capacitor Placement Problem consists of finding places to install capacitor banks in an electrical distribution network aiming to reduce losses due to the compensation of the reactive component of power flow. This problem can be formulated as a non-linear mixed-integer optimization model and its solution has represented a challenge for many optimization methods in the past decades. This paper proposes a new method, based on evolutionary algorithms, capable of solving large network instances that appear in real-world settings. Our evolutionary approach makes use of a memetic algorithm that employs an hierarchical organization of the population in overlapping clusters leading to special selection and reproduction schemes. Computational tests were executed with a real distribution network. Tests include a sensitivity analysis of the algorithm to the optimization's critical parameters such as the energy cost, the maximum budget available to acquire and install the capacitors, and the capital recovery term of the investment.

Keywords – Genetic algorithms, capacitor placement, memetic algorithms, electrical distribution systems.

Introduction

Electric distribution networks can be represented as an acyclic graph where the source nodes are substations which supply energy consumed by customers located at the sink nodes. To every sink node it is associated a forecast demand calculated for a specific year in the future. Energy is transported by conductors known as feeders and the edges of the graph are named as feeder sections. Capacitors are widely used in such networks as a means of reducing reactive losses due to the inductive reactive portion of the line loading. There are other beneficial effects from the application of capacitors such as power factor correction, power flow control and improvement of stability. However, the extent of these benefits greatly depends on the way capacitors are located at the feeders' network and also their sizes. Mathematically, the capacitor placement problem - CPP - can be formulated as a non-linear mixed integer optimization problem where the objective function consists of minimizing the power losses and investment

costs. The main constraints comprise load constraints at each bus, and operational constraints as voltage profile and current magnitudes at each node and each feeder section during varying loading levels. The non-linear character is only due to the losses in the objective function while integrality must be enforced because of the binary variables necessary to model the places, the quantities and the sizes of the capacitors to be installed. For details about the mathematical model, the reader may refer to Baran and Wu (1989a,b).

It is well known that the CPP is a hard combinatorial optimization problem, especially because real distribution networks are commonly very large and the benefits of installing capacitors in one part of the network are propagated to other parts. Hence, effective location studies should be conducted taking into consideration the whole distribution system.

In the past decades, many optimization methods have been proposed for solving the CPP. A literature survey describing the main capacitor allocation techniques

can be found in Ng et al. (2000). Among various approaches, the metaheuristics play a relevant role, since exact optimization methods are not suitable for tackling real world instances. Focusing only on metaheuristic methods, the article of Chiang et al. (1995) proposes a *Simulated Annealing* approach. *Tabu Search* is also a possible technique capable of dealing with large instances (Huang et al., 1996; Gallego et al., 2001). However, the most used technique is based on the evolutionary approach (Sundhararajan e Pahwa, 1994; Miu et al., 1997; Ghose et al., 1999; Levitin et al., 2000).

This article presents a new approach based on a genetic algorithm (GA) for solving the PCC. Its main contributions are the use of a memetic type of GA (Corne et al., 1999), where a local search phase is added to the GA, and in the use of an hierarchical organization of the population in overlapping clusters leading to special selection and reproduction schemes. The proposal also includes some practical considerations such as yearly budget restrictions which limit the amount of investment in new capacitor acquisitions. The method is capable of performing capacitor placement studies in large distribution systems, finding near-optimal solutions in a short running time.

A memetic algorithm approach

In this section, the implementation of the memetic algorithm (MA) is discussed. MAs are population-based methods that can be taken as an extension of genetic algorithms (GA). The main difference between a GA and the MA implemented in this paper is that the later includes a local search procedure, applied on all new individuals created during the evolutionary process. Basically, an MA makes a population of solutions to evolve through the application of recombination, mutation and natural selection operators. The fitter individuals shall survive longer, thus perpetuating their genetic information. After several generations, we expect the population to be composed of high-quality individuals, which represent good solutions for the CPP. Next, a simplified pseudo-code of the implemented MA is shown:

- a. Create the initial population.
- b. Select individuals for recombination.
- c. Recombine the selected individuals, creating new ones through crossover mechanisms.
- d. Mutate the new individuals.
- e. Apply a local search operator on the new individuals.
- f. Insert the new individuals into the population, replacing the worse ones. Go back to step b.

Before describing these steps, the representation of individuals utilized in the MA is illustrated. The representation chosen for the CPP is a two-part chromosome. The alleles of the first part can only assume

binary values, coding the candidate locations status (the sections of the feeder). If the allele in position i equals 1, it means a capacitor should be placed in the i -th feeder section, otherwise not. The second part is composed of integer values, indexing the capacitor size. Both parts of the chromosome have n positions, where n is the number of sections of the feeder. In Figure 1, we show an example of solution for a feeder with six sections.

[0 1 1 0 0 1 / 3 5 2 1 2 4]					
sections			capacitor sizes		

Figure 1: Chromosome coding.

Table 1: Capacitor data

Index	Size in kVAr	Cost in dollars (US\$)
1	150	1,498
2	300	1,604
3	450	1,620
4	600	1,823
5	900	2,550
6	1200	2,955

Analyzing the Figure 1 and the Table 1, the sections 2, 3 and 6 will receive capacitors with sizes 900, 300 and 600 kVar, respectively, and the total cost would be US\$6.196,61. The other sections will not receive any capacitor because their correspondent alleles in the first part of the chromosome is set to zero. In such cases, the numbers in the second part of the chromosome should be ignored when calculating the cost and the electric power loss correspondent to this solution. Now, the MA pseudo-code will be described.

Creating the initial population

Initially, we will describe a particular feature of the population utilized in this work: the hierarchical structure. Our previous experience in solving combinatorial optimization problems through genetic algorithms shows that the use of hierarchically structured populations leads to performance improvements over non-structured population approaches. The hierarchy follows a ternary tree, as shown in Figure 2. One can see the structure as a set of 4-individual clusters; each one composed of a leader and three supporter individuals. In each cluster, the leader is the fittest one. This hierarchy makes the individuals at the upper levels be fitter, in general, than the ones in the lower parts of the tree. As a consequence, the best solution is always placed at the upper cluster, at the root of the population tree. Extensive computational tests proved that the use of a complete three-level tree with 13 individuals is the best choice. This value might seem too low when compared to other evolutionary approaches where non-

structured populations of hundreds of individuals are usually utilized. Nevertheless, the use of the hierarchy allows a major reduction of the number of individuals without loss of performance.

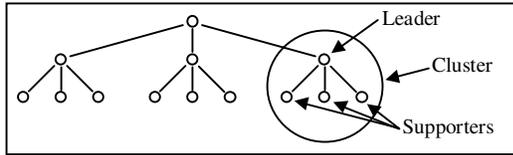


Figure 2: Hierarchically structured population.

The initial population is created according to the following scheme: about 20% of the sections initially should receive a capacitor and their sizes vary in the range [150, 1200] kVar, with a major concentration between 300 and 600 kVar.

Selection of individuals for recombination

In the selection of individuals for recombination, firstly we randomly select a leader following a uniform distribution. The next step is to choose which one of the three supporters will take part in the recombination. This choice is also equally at random. Following this selection strategy, any pair of parents will belong to the same cluster. That makes the population act similarly to a multiple population approach with a high migration rate. Most likely, this is the cause of the algorithm's superior performance when compared to non-structured populations. Finally, it is worth mentioning that there is no restriction to the number of times a given individual takes part in a crossover in the same generation.

Recombination

After the parents were selected following the criterion described before, they are utilized as input parameters in the recombination operator. The recombination returns a new individual – the offspring.

Parent A	0 1 0 1 1 0	3 2 1 1 4 2
Parent B	1 1 1 1 0 1	5 1 5 3 3 2
Offspring	1 1 0 1 0 1	4 1 3 2 4 2

Figure 3: Recombination operator.

Since the chromosome is composed of two distinct parts, they should be treated separately during the recombination process. There are, in fact, two recombination strategies: one for the chromosome's binary part and another for the integer part. In the binary part, we adopted the Uniform

Crossover (UX), where the offspring's allele is determined by randomly choosing the value present in one of the parents. If the parents share the same allele in a given position, the offspring will inherit this value. If the values are distinct, the offspring might inherit values zero or one, with the same probability. In the integer part, we calculate the average of the values found in the parents. That is, the values in the same position of the parents are added and divided by two. This will be the value inherited by the offspring. If the sum is odd, the division results in a non-integer value which is rounded up or down, at random.

Figure 3 illustrates the recombination operator. In the first part of the chromosome, the offspring's positions 1 and 3 inherit the value 1, while the other positions are decided at random. In the second part, the values is calculated as averages, rounded up or down if necessary. In position 5, for instance, the parents' values are 4 and 3. The average of 3.5 was rounded up by a random decision.

As one can note, the most important characteristic of this operator is the maintenance of the common features of the parents. Conflicting features are resolved randomly, in the binary part, and through an averaging procedure, in the integer part.

The crossover rate was decided after several tests with many values, ranging from 0.5 up to 2. At the end we decided for the creation of 20 individuals per generation, corresponding to a crossover rate of 1.5. This value might seem exaggerated, but as we utilize a very strict insertion policy, many of those 20 new individuals are discarded, balancing the algorithm's dynamic. The insertion policy will be described later.

Mutation

The mutation operator aims to add diversity to the population of individuals. Similarly to the crossover, the mutation is divided into two parts. The first one modifies the binary portion of the chromosome by choosing a position of the individual at random and changing the allele's value (*bit-swap*). The second part acts on the integer values by adding or subtracting an unity from its value. The choice to add or subtract is also decided at random. Mutation is applied to 10% of the offspring. In general, higher mutation rates should be avoided because they add noise to the evolutionary process, eliminating good features already present at the chromosomes.

Local search optimization

After the tests, we are positive to say that the local search is a crucial step in the algorithm. The pure GA, without local search, performs much worse than the MA. Next, we describe three local search policies utilized in this work.

a) Add/Drop local search

This local search acts only at the first part of the chromosome, i.e., trying to improve capacitor location. Each position of the chromosome is sequentially changed to its opposite value, and then it is verified if the fitness has improved. If a specific location already has a capacitor, the local search tests the possibility of dropping that capacitor (*Drop*). Analogously, it tries to put capacitors at locations without any (*Add*). In the case of deterioration of the solution, the position returns to the original value and the local search proceeds to the next one.

b) Capacitor's size local search

This local search adjusts the sizes of the capacitors already present in the solution, trying to find the best size for each location. The sizes immediately above and under the present capacitor's size are tested. For instance, if there is a 600 kVar capacitor installed in a given position, the procedure tries the capacitors with sizes 450 and 900 kVar, looking for any improvement. Such tries are executed, similarly as in the Add/Drop procedure, in one capacitor at a time.

c) Swap local search

This scheme removes a capacitor from a position, installing it in another one. That preserves the number of capacitors, being a complementary local search to the Add/Drop scheme, which changes the number of installed capacitors.

Insertion of new individuals

Each new individual created has two chances of being inserted. It may replace one of its parents – the leader of the cluster and the supporter – depending on whether or not it is better than them. If the new individual is worse than both parents, it is discarded. This is a very elitist insertion policy but, together with a good mutation scheme, it allows the maintenance of diversity for longer, concurrently with a faster population's convergence rate.

Once all new individuals were created, and inserted or discarded, the algorithm starts the population structure update. As the ternary tree must maintain the hierarchy between leaders and supporters, we verify if any individual became better than the leader of its cluster. In this case, they swap places. Another feature commonly adopted in MAs is the elitism, which forces the presence of the incumbent solution in the population. In our implementation, this feature comes naturally from the population hierarchy, together with the policy of inserting the offspring only if it improves the population's average fitness.

Fitness function

The fitness function quantifies the quality of the individual. Therefore, it shall keep a close relation with the objective function of the problem.

The first factor to be observed is the cost of the power losses, which takes into account the maximum voltage deviation observed in the distribution network's nodes for a given solution. The calculation of the power losses requires the execution of a load flow algorithm (Baran and Wu, 1989a). The power loss before and after the installation of capacitors are calculated and the energy gain (Δgain) is summed up and then expressed as an annual gain (AnnualGain). For this, it is utilized the following transformation:

$$\text{AnnualGain} = 8.75 \times \text{MWhCost} \times \Delta\text{gain},$$

where MWhCost is the cost, in dollars, of the MWh at the energy market. The value 8.75 is a constant that transforms kW into MWh per year. This constant represents the number of hours in a year, divided by 1,000, since Δgain is given in kW and the energy cost in US\$/MWh.

Proceeding with the calculus of the fitness of the solution, the annual gain is subtracted from the cost corresponding to the capacitor acquisitions, which is calculated as the sum of the costs of all equipment to be installed. This value is also transformed into an equivalent annual cost (AnnualCost). For this it is necessary to define a capital recovery period (k) for the equipment and an interest rate (i). The recovery period corresponds to the life for computing the equipment depreciation. To do so, we utilize the classical engineering economy transformation that, given the initial investment of the equipment (CapCost), calculates the annual payment necessary to recover the capital cost in k years with an interest rate i . Therefore the annualized cost is:

$$\text{AnnualCost} = (i \cdot \text{CapCost}) / (1 - (1/(1+i)^k))$$

We also included an option to restrict the annual budget available for investment in capacitor installation, since that in real situations, budget constraints are usual. This constraint is controlled in the fitness function by the equation:

$$\text{Dev}_A = (\max [0, \text{AnnualCost} - \text{Budget}])^2,$$

where Budget is the maximum annual budget available to install the capacitors. The square penalization had an excellent behavior, creating feasible individuals in the MA's first generations.

Finally there is also an option to limit the number of installed capacitors. This constraint comes from operational restrictions related to the maintenance team. The equation to control the maximum number of capacitors is:

$$\text{Dev}_B = (\max [0, \text{NumberCap} - \text{MaxNumberCap}])^2,$$

where MaxNumberCap is the maximum number of capacitors to be installed in the distribution network and NumberCap is the number of capacitors present in the solution. Finally, the fitness of the individual is then calculated as:

$$\text{fitness} = \text{AnnualGain} - \text{AnnualCost} - \text{Dev}_A - \text{Dev}_B$$

Computational Tests

This section presents some numerical results obtained from computational experiments performed with the proposed method. In order to demonstrate the potentialities of the method in dealing with large real-world networks, we have chosen a medium-sized city as a case study.

Table 2: Distribution network main characteristics

Number of nodes (sections)	2,274
Number of feeders	3
Initial power losses	663.62 kW

The parameters included in the sensitivity analysis are energy price, annual budget and capital recovery time. The next tables will present the following information:

- **Total capacity:** Sum of the sizes of the capacitors installed. The number of capacitors is shown in parenthesis.
- **Losses in kW:** Corresponds to the technical losses after the installation of the capacitors. This value should be compared to the initial power losses in Table 2.
- **Annual profit:** The total annual gain in losses obtained after the installation of the capacitors, minus the investment costs.

Energy price sensitivity analysis

The aim is to observe the behavior of the annual profit when one varies the price of energy. The parameters were set as follows: energy price (US\$/MWh) from US\$ 21 up to US\$ 125; unlimited maximum number of capacitors; unlimited annual budget; capital recovery period of five years.

Table 3: Energy price sensitivity analysis

Energy price	Total capacity (# of capacitors)	Losses in kW	Annual profit
21	6,450 (15)	585	7,097
41	10,800 (21)	564	25,856
83	14,850 (41)	553	61,683
125	17,100 (46)	550	102,729

Table 3 shows that as the energy price increases, it becomes advantageous to install more capacitors in the

network. In this case, their cost is more than compensated by the savings that result from the power loss reduction.

When the energy price reaches US\$ 125, the method suggests the installation of 46 capacitors, a very large amount, even for a medium-sized city. The inclusion in the algorithm of a constraint limiting the number of capacitors avoids this kind of outcome. Solutions with too many capacitors may create operational difficulties, since they would substantially increase the maintenance cost, not included as a cost component in our model.

Maximum budget sensitivity analysis

The parameters were set as follows: energy price = US\$ 41/MWh; unlimited maximum number of capacitors; annual budget ranging between US\$ 2,083 and US\$ 12,500; the capital recovery period was set to five years.

Table 4: Maximum budget variation analysis.

Annual budget	Total capacity (# of capacitors)	Losses in kW	Annual profit
2,083	2,100 (4)	627	11,112
4,166	4,800 (8)	603	17,726
8,333	7,200 (18)	577	22,886
12,500	10,800 (21)	564	25,969

Table 4 shows that the algorithm adapts itself to the budget variation. As the budget is increased, more capacitors are installed and the profit improves. Note that, with an energy price around US\$ 41/MWh, the profit ranges from 2 to 5 times the initial capital invested – a expressive rate of return. This interval's boundaries are proportional to the MWh price. If the energy is more expensive, the profit becomes even larger.

Capital recovery period sensitivity analysis.

The parameters were set as follows: the energy price is US\$ 41/MWh; unlimited maximum number of capacitors; unlimited annual budget; capital recovery period ranges between 1 and 10 years.

Table 5: Sensitivity analysis of the capital recovery period

Period in years	Total capacity (# of capacitors)	Losses in kW	Annual profit
1	3,450 (7)	603	8,484
3	9,000 (15)	569	22,128
5	10,800 (21)	564	25,856
10	13,800 (38)	555	28,498

The capital recovery period is strongly reflected on the capacitors' costs. Since the annualized capacitor cost is reduced when the capital recovery period becomes large, the algorithm suggests to acquire more equipment in this situation. For shorter periods, fewer capacitors are installed.

Conclusions

This article proposes a new methodology based on genetic algorithms to deal with the capacitor placement problem in radial distribution electric networks. Our evolutionary approach makes use of a memetic algorithm that employs an hierarchical organization of the population in overlapping clusters leading to special selection and reproduction schemes. Computational tests performed in a large real-world instance have demonstrated that the method is a powerful and fast tool for helping planners to find out the best places to install capacitors. The tests include a sensitivity analysis for some critical planning parameters as the energy cost, the available annual budget and the capital recovery period.

The results show that the new approach is able to provide expressive annual cost savings even in presence of different parameters settings. The method is stable, smoothly adapting itself to the different parameters, as they were changed.

Acknowledgments

This research was partially supported by Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), FAPESP and CNPq.

References

- Baran, M.E. and Wu, F.F., (1989a), Optimal capacitor placement on radial distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery* 4(1), pp. 725-734.
- Baran, M.E. and Wu, F.F., (1989b), Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery* 4(1), pp. 735-743.
- Chiang H.D., Wang, J.C., Cokings, O., and Shin, H.D., (1990), Optimal capacitor placement in distribution systems - Part II: solution algorithms and numerical results, *IEEE Transactions on Power Delivery* 5(2), pp. 643-649.
- Corne, D., Dorigo, M., and Glover, F. (Eds),. (1999). *New Ideas in Optimization*, McGraw-Hill, UK.
- Gallego, R.A., Monticelli, A.J., and Romero, R., (2001), Optimal capacitor placement in radial distribution networks, *IEEE Transactions on Power Systems* 16(4), pp. 630-637.
- Ghose, T., Goswami, S.K., and Basu, S.K., (1999), Solving capacitor placement problems in distribution systems using genetic algorithms, *Electric Machines and Power Systems* 27, pp. 429-441.
- Huang, Y.C., Yang, H.T., and Huang, C.L., (1996), Solving the capacitor placement problem in a radial distribution system using tabu search approach, *IEEE Transactions on Power Systems* 11(4), pp. 1868-1873.
- Levitin, G., Kalyuzhny A., Shenkman, A., and Chertkov, M., (2000), Optimal capacitor allocation in distribution systems using a genetic algorithm and a fast energy loss computation technique, *IEEE Transactions on Power Delivery* 15(2), pp. 623-628.
- Miu, K.N., Chiang, H.D., and Darling, G., (1997), Capacitor placement, replacement and control in large-scale distribution systems by a GA-based two-stage algorithm, *IEEE Transactions on Power Systems* 12(3), pp. 1160-1166.
- Ng, H.N., Salama, M.M.A., and Chikhani, A.Y., (2000), Classification of capacitor allocation techniques, *IEEE Transactions on Power Delivery* 15(1), pp. 387-392.
- Sundhararajan, S., and Pahwa, A., (1994), Optimal selection of capacitors for radial distribution systems using a genetic algorithm, *IEEE Transactions on Power Systems* 9(3), pp. 1499-1507.

Bibliografia

- Ahuja, R. K., Magnanti, T. and Orlin, J. B. (1993). *Network Flows: Theory, Algorithms and Applications*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Ananthapadmanabha, T., Kulkarni, A. D., Rao, A. S. G. and Rao, K. R. (1996). Knowledge-based expert system for optimal reactive power control in distribution system, *Electric Power & Energy Systems* **18**(1): 27–31.
- Augugliaro, A., Dusonchet, L. and Mangione, S. (1990). Optimal capacitive compensation on radial distribution systems using nonlinear programming, *Electric Power Systems Research* **19**: 129–135.
- Augugliaro, A., Dusonchet, L. and Mangione, S. (1995). An efficient greedy approach for minimum loss reconfiguration of distribution networks, *Electric Power Systems Research* **35**: 167–176.
- Baldick, R. and Wu, F. F. (1990). Efficient integer optimization algorithms for optimal coordination of capacitors and regulators, *IEEE Transactions on Power Delivery* **05**(03): 805–812.
- Baran, M. E. and Wu, F. F. (1989a). Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing, *IEEE Transactions on Power Delivery* **04**(02): 1401–1407.
- Baran, M. E. and Wu, F. F. (1989b). Optimal capacitor placement on radial distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery* **4**(1): 725–734.

- Baran, M. E. and Wu, F. F. (1989c). Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery* **4**(1): 735–743.
- Boone, G. and Chiang, H. (1993). Optimal capacitor placement in distribution systems by genetic algorithm, *Electric Power & Energy Systems* **15**(3): 155–162.
- Borozan, V., Rajicic, D. and Ackovski, R. R. (1997). Minimum loss reconfiguration of unbalanced distribution networks, *IEEE Transactions on Power Delivery* **12**(01): 435–442.
- Brooks, C. L., Kennedy, B. and Sanders, J. (eds) (1986). *A Method for Evaluating the General Load and Loss Effects of Demand Side Management on the T and D Delivery System 86 T & D 587-0*, 10th IEE/PES T&D Conference.
- Buch, J., Miller, R. and Wheeler, J. (1982). Distribution system integrated voltage and reactive power control, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **101**(02): 284–289.
- Bueno, E. A. (2000). *Redução de perdas na distribuição de energia elétrica pelo método grasp*, Master's thesis, Faculdade de Engenharia Elétrica, FEEC, UNICAMP.
- Carlisle, J. C. and El-Keib, A. A. (2000). A graph search algorithm for optimal placement of fixed and switched capacitors on radial distribution systems, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **15**(1): 423–428.
- Castro, C. and Watanabe, A. (1990). An efficient reconfiguration algorithm for loss reduction of distribution systems, *Electric Power Systems Research* **19**: 137–144.
- Cavellucci, C. (1998). *Buscas Informadas Baseadas em Grafos para a Minimização das Perdas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*, PhD thesis, Faculdade de Engenharia Elétrica, FEEC, UNICAMP.

- Cavellucci, C. and Lyra, C. (1997). Minimization of energy losses in electric power distribution systems by intelligent search strategies, *International Transactions on Operations Research* **04**(01): 23–33.
- Chen, C. and Cho, M. (1993). Energy loss reduction by critical switches, *IEEE Transactions on Power Delivery* **08**(03): 1246–1253.
- Cherkaoui, R., Bart, A. and Germond, A. (eds) (1993). *Optimal Configuration of Electrical Distribution Networks using Heuristic Methods*, Vol. 11, Power System Computation Conference (PSCC).
- Chiang, H. and Jumeau, R. (1990a). Optimal network reconfigurations in distribution systems: Part 2: Solution algorithms and numerical results, *IEEE Transactions on Power Delivery* **05**(03): 1568–1574.
- Chiang, H. and Jumeau, R. (1990b). Optimal network reconfigurations in distribution systems: Part 1: a new formulation and a solution method, *IEEE Transactions on Power Delivery* **05**(04): 1902–1909.
- Chung, T. S. and Shaoyun, G. (1997). A recursive lp-based approach for optimal capacitor allocation with cost-benefit consideration, *Electric Power Systems Research* **39**: 129–136.
- Civanlar, S., Grainger, J. J., Yin, H. and Lee, S. S. H. (1988). Distribution feeder reconfiguration for loss reduction, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **03**(03): 1217–1223.
- Cook, R. F. (1959). Analysis of capacitor application as affected by load cycle, *AIEE Transactions pt. III* **78**: 950–957.

- Costa, M. F. N. (1999). *Computação evolutiva para minimização de perdas resistivas em sistemas de distribuição de energia elétrica*, Master's thesis, Faculdade de Engenharia Elétrica, FEEC, UNICAMP.
- de Medeiros Jr., M. F. and Filho, M. C. P. (2000). Maximização do lucro com a distribuição de energia elétrica através da alocação de capacitores em alimentadores de 13,8 kv, *Anais do XIII Congresso Brasileiro de Automática*, Sociedade Brasileira de Automática, pp. 1180–1184.
- Durán, F. (1968). Optimum number, location, and size of shunt capacitors in radial distribution feeders: A dynamic programming approach, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **87**(09): 1769–1774.
- Elgerd, O. L. (1977). *Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica*, Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda.
- Feo, T. A. and Rezende, M. G. C. (1995). Greedy randomized adaptive search procedures, *Journal of Global Optimization* **06**: 109–133.
- Feo, T. and Rezende, M. (1994). A greedy randomized adaptive search procedure for maximum independent set, *Operations Research* **42**: 860–879.
- Gallego, R. A., Monticelli, A. J. and Romero, R. (2001). Optimal capacitor placement in radial distribution networks, *IEEE Transactions on Power Systems* **16**(4): 630–637.
- Gauche, Coelho and Teive (1999). A mixed back-propagation/marquatt-levenberg algorithm for optimizing the distribution electrical system operation, *Proceedings of the 1999 IEEE Transmission and Distribution Conference* **02**: 753–758.
- GCPS (1998). *Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos, Plano Decenal de Expansão 1998/2007*, Eletrobrás - Ministério de Minas e e Energia.

- Ghose, T., Goswami, P. and Basu, S. (1999). Solving capacitor placement in distribution systems using genetic algorithms, *Electric Machines and Power Systems* **27**: 429–441.
- Glamocanin, V. (1990). Optimal loss reduction of distribution networks, *IEEE Transactions on Power System* **05**: 774–782.
- Glover, F. and Laguna, M. (1997). *Tabu Search*, Kluwer Academic Pub., Norwell, Massachusetts.
- Gönen, T. (1986). *Electric Power Distribution System Engineering*, McGraw-Hill Book Company.
- Gonzalez, J. F. V. and Lyra, C. (2003). *Redução de perdas em redes primárias de distribuição de energia elétrica por instalação e controle de capacitores*, Master's thesis, Faculdade de Engenharia Elétrica - FEEC - UNICAMP.
- Goswami, P. and Basu, S. (1992). A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders, *IEEE Transactions on Power System* **07**(03): 1484–1491.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The University of Michigan Press.
- Huang, K. Y. and Chin, H. C. (2002). Distribution feeder energy conservation by using heuristics fuzzy approach, *Electrical power and Energy Systems* **24**: 439–445.
- Huddleston, C., Broadwater, R. and Chandrasekaran, A. (1990). Reconfiguration algorithm for minimization losses in radial electric distribution system, *Electric Power Systems Research* **18**: 57–66.
- Iba, K. (1994). Reactive power optimization by genetic algorithm, *IEEE Transactions on Power Systems* **9**(2): 685–692.

- Jasmon, J. B., Callistus, L. H. and Lee, C. (1991). A modified technique for minimization of distribution system losses, *Electric Power Systems Research* **20**: 81–88.
- Jensen, P. and Barnes, J. (1980). *Network Flow Programming*, John Wiley - New York.
- Jiang, D. and Baldick, R. (1996). Optimal electric distribution system switch reconfiguration and capacitor control, *IEEE Transactions on Power Systems* **11**(02): 890–897.
- Jung, K. H., Kim, H. and Ko, Y. (1993). Network reconfiguration algorithm for automated distribution systems based on artificial intelligent approach, *IEEE Transactions on Power Delivery* **08**(04): 1933–1941.
- Kim, H., Ko, Y. and Jung, K. H. (1993). Artificial neural-network based feeder reconfiguration for loss reduction in distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery* **08**(03): 1356–1366.
- Kirkpatrick, S., Jr., C. G. and Vecchi, M. (1983). Optimization by simulated annealing, *Science* **220**: 671–679.
- Laframboise, J. R. P. R., Ferland, G., Salama, M. M. A. and Chikhani, A. Y. (1995). An expert system for reactive power control of a distribution system—part 2: System implementation, *IEEE Transactions on Power Delivery* **10**: 1433–1441.
- Lee, R. E. and Brooks, C. L. (1988). A method and its application to evaluate automated distribution control, *IEEE Transactions on Power Delivery* **03**(03): 1232–1240.
- Levitin, G., Kalyuzhny, A., Shenkman, A. and Chertkov, M. (2000). Optimal capacitor allocation in distribution systems using a genetic algorithm and a fast energy loss computation technique, *IEEE Transactions on Power Delivery* **15**(2): 623–628.
- Lin, W. M. and Chin, H. C. (1998). A new approach for distribution feeder reconfiguration, *IEEE Transactions on Power Delivery* **04**(02): 1281–1289.

- Liu, C. C., Lee, S. and Vu, K. (1989). Loss minimization feeders: optimality on power delivery, *IEEE Transactions on Power Delivery* **04**(02): 1281–1289.
- Luenberger, D. (1984). *Linear and Nonlinear Programming*, Reading, MA: Addison Wesley.
- Lyra, C. (1984). *Contribuição ao Planejamento da Produção de Energia em Sistemas de Potência*, PhD thesis, Faculdade de Engenharia Elétrica, FEEC, UNICAMP.
- Lyra, C., Pissarra, C. M. A. and Cavellucci, C. (2000). Redução das perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica, *Anais do XIII Congresso Brasileiro de Automática* .
- Lyra, C., Vizcaino, J., França , P. and Cavellucci, C. (2002). *Estratégias Evolutivas para Otimização do Controle de Reativos com Sazonalidade de Demandas — Levantamento do Estado do Conhecimento e Indicação de Abordagens Metodológicas*, Relatório Técnico R1 - Controle de Reativos.
- Manhães, R., França , P., Lyra, C., Pissarra, C. and Cavellucci, C. (2002). Reconfiguração de redes para redução das perdas técnicas em sistemas de distribuição de energia elétrica, *Anais do XV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (SENDI)* .
- McDermott, T. E., Drezga, I. and Broadwater, R. P. (1999). A heuristic constructive method for distribution system reconfiguration, *IEEE Transactions on Power Systems* **14**(02): 478–483.
- Mendes, A., França, P., Lyra, C., Pissarra, C. and Cavellucci, C. (2002). An evolutionary approach for capacitor placement in distribution networks, *Proceedings of Third International NAISO Symposium on Engineering of Intelligent Systems*, Natural and Artificial Intelligence Systems Organizations (NAISO), Malaga, Spain.
- Mendes, A., Lyra, C., Pissarra, C., França , P. and Cavellucci, C. (2001). *Abordagem Unificada da Instalação de Capacitores e Reconfigurações com Objetivo de Redução de Perdas - Elaboração da Metodologia*, Relatório Técnico RS - Aditivo 01.

- Merlin, A. and Back, H. (eds) (1975). *Search for a Minimal-Loss Operating Spanning Tree Configuration in an Urban Power Distribution System*, Vol. 05, Proceedings of PSCC, Cambridge, UK.
- Miu, K., Chiang, H. and Darling, G. (1997). Capacitor placement, replacement and control in large-scale distribution systems by a ga-based two-stage algorithm, *IEEE Transactions on Power Systems* **12**(3): 1160–1166.
- Nara, K., Shiose, a., Kitagawa, M. and Ishihara, T. (1992). Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum reconfiguration, *IEEE Transactions on Power Systems* **07**(03): 1044–1051.
- Neagle, N. M. and Samson, D. R. (1956). Loss reduction from capacitor installed on primary feeders, *AIEE Transactions pt. III* **75**: 950–959.
- Pearl, J. (1984). *Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving*, Reading MA: Addison-Wesley.
- Peponis, G. J., Papadopoulos, M. P. and Hatziargyriou, N. D. (1995). Distribution network reconfiguration to minimize resistive line losses, *IEEE Transactions on Power Delivery* **10**(03): 1338–1342.
- Peponis, G. J., Papadopoulos, M. P. and Hatziargyriou, N. D. (1996). Optimal operation of distribution networks, *IEEE Transactions on Power Systems* **11**(01): 59–67.
- Roytelman, L., Melnik, V., Lee, S. S. H. and Lugtu, R. L. (1996). Multi-objective feeder reconfiguration by distribution management system, *IEEE Transactions on Power Systems* **11**(02): 661–667.
- Salama, M. M. A. and Chikhani, A. Y. (1992). An expert system for reactive power control of a distribution system—part 1: System configuration, *IEEE Transactions on Power Delivery* **7**: 940–945.

- Sarfi, R. J., Salama, M. and Chikhani, A. (1996). Distribution system reconfiguration for loss reduction: an algorithm based on network partitioning theory, *IEEE Transactions on Power System* **11**(01): 504–510.
- Sarfi, R. J. and Solo, A. M. G. (2002a). Network radiality, parameter, and performance heuristics in optimization of power distribution system operations. part 1: Crisp rule base, *Electrical Power and Energy Systems* **24**: 673–682.
- Sarfi, R. J. and Solo, A. M. G. (2002b). Network radiality, parameter, and performance heuristics in optimization of power distribution system operations. part 2: Fuzzification of rule base, *Electrical Power and Energy Systems* **24**: 683–692.
- Shirmohammadi, D. and Hong, H. (1989). Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction, *IEEE Transactions on Power Delivery* **04**: 1492–1498.
- Su, C. T. and Lee, C. S. (2001). Feeder reconfiguration and capacitor setting for loss reduction of distribution systems, *Electric Power Systems Research* **58**: 97–102.
- Taleski, R. and Rajicic, D. (1997). Distribution network reconfiguration for energy loss reduction, *IEEE Transactions on Power Systems* **12**(01): 398–406.
- Tao, W., Cavellucci, C. and Lyra, C. (1999). Minimização de perdas na distribuição de energia elétrica por busca informada com processamento paralelo, *Anais do Congresso Brasileiro de Automática - SP* **11**.
- Taylor, T. and Lubkeman, D. (1990). Implementation of heuristic search strategies for distribution feeder reconfiguration, *IEEE Transactions on Power Delivery* **05**(01): 239–246.
- Travesso, L. D., Ribeiro, S. and Ruschman, A. (2002). *ABAMEC-2002*, Relatório Anual da Eletrobrás - Ano 2002. www.eletropaulo.com.br.

- Vargas, P. A. (2000). *Sistemas classificadores para redução de perdas em redes de distribuição de energia elétrica*, Master's thesis, Faculdade de Engenharia Elétrica, FEEC, UNICAMP.
- Vargas, P. A., Lyra, C. and Zuben, F. V. (2002). *On-line Approach for Loss Reduction in Electric Power Distribution Networks Using Learning Classifier Systems*, Springer-Verlag, Heidelberg.
- Wagner, T., Chikhani, A. and Hackam, R. (1991). Feeder reconfiguration for loss reduction: an application of distribution automation, *IEEE Transactions on Power Delivery* **06**(04): 1922–1933.
- Wang, J. C., Chiang, H. D. and Darling, G. R. (1996). An efficient algorithm for real-time network reconfiguration in large scale unbalanced distribution systems, *IEEE Transactions on Power Systems* **11**(01): 511–517.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets, *Information and Control* **8**: 338–353.
- Zhou, Q., Shirmohammadi, D. and Liu, W. (1997). Distribution feeder reconfiguration for operation cost reduction, *IEEE Transactions on Power Systems* **12**(02): 730–735.