

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS

Este exemplar corresponde a redação final da tese
defendida por EDILSON APARECIDO
BUENO e aprovada pela Comissão
Julgada em: 10 / 08 / 2000
Orientador

***Redução de Perdas na Distribuição de Energia Elétrica
pelo Método GRASP***

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

EDILSON APARECIDO BUENO

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Christiano Lyra Filho (Orientador)
Prof. Dr. José Antonio Jardini
Prof. Dr. Carlos Alberto Favarin Murari
Prof. Dr. Leonardo Nepomuceno

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

- Agosto / 2000 -

UNICAMP

79 X 107 mm

UNIDADE BC
N.º CHAMADA:
7 / UNICAMP
B. 862r
V. _____ Ex. _____
TOMBO BC/ 43620
*ROC. 16-392107
C D
REC# R\$ 110,0
ATA 07/02/07
* CPD _____



CM-00153657-3

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

B862r

Bueno, Edilson Aparecido

Redução de perdas na distribuição de energia elétrica pelo método GRASP / Edilson Aparecido Bueno.-- Campinas, SP: [s.n.], 2000.

Orientador: Christiano Lyra Filho

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

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

Sumário

Em sistemas de energia elétrica, continuamente ocorrem perdas, devido à resistência elétrica nas linhas e equipamentos. Estima-se que 7% de toda a energia elétrica gerada em sistemas de potência são perdidas, sendo 2% na transmissão e 5% na distribuição. O problema de minimização de perdas procura encontrar uma configuração da rede onde o montante das perdas seja reduzido. Este trabalho propõe um procedimento que combina técnicas para otimização de fluxos em redes com funções não lineares com o método GRASP para otimização combinatória. GRASP é um método iterativo que combina um método construtivo com busca local. Na fase de construção, cria uma solução viável, combinando uma função gulosa com seleção aleatória. Na fase de busca local, procura melhorar a solução. A estrutura da rede de distribuição de energia elétrica é usualmente radial. Inicialmente, relaxa-se a restrição de operação radial, encontrando-se uma solução otimista (limitante inferior) para o problema. Informações sobre os valores dos fluxos nos arcos da solução otimista são utilizadas para abrir chaves, guiando a fase de construção do método GRASP para encontrar soluções factíveis de boa qualidade. A busca local procura obter reduções adicionais de perdas através do método de troca de ramos. Estudos de casos ilustram as possibilidades da abordagem.

Abstract

Energy is continuously dissipated in electric power systems due to electrical resistance in the lines and equipment. Losses amount to around 7% of total energy production, 2% in transmission and 5% in distribution. The problem of loss minimization tries to find a network configuration where the amount of losses is reduced. This work proposes a procedure that combines non-linear network flow optimization techniques with the GRASP method. GRASP is an iterative method that uses a combination of a constructive procedure with a local search. The construction phase obtains a feasible solution, combining a greedy function with a randomize selection. The local search tries to improve the solution. The structure of the electric power distribution network usually has a radial configuration. Initially, the constraint of radial operation is relaxed, meeting an optimistic solution (a lower bound) for the problem. Information from arc flows in the optimistic solution are used to open switches, guiding the construction phase of GRASP to find feasible and good quality solutions. The local search tries to get additional reductions of losses through the branch-exchange procedure. Case studies illustrate the possibilities of the approach.

Este trabalho teve o apoio da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL).

Buscai primeiro o Reino de Deus e toda a Sua justiça, todas as outras coisas lhes serão dadas em acréscimo.

Mateus 6, 33

À minha família.

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por Ele ter me iluminado, estando sempre presente em todos os momentos da minha vida; sem a ajuda Dele nada seria possível.

Ao Christiano, que foi muito mais que um orientador, tornando-se um amigo dedicado. Suas orientações foram fundamentais para a conclusão desta tese.

Minha eterna gratidão à minha família pela compreensão e dedicação que me permitiram dar seqüência aos meus estudos, mesmo nos momentos mais difíceis.

A Sirlene, pela suas correções e principalmente pela presença ao meu lado, sempre com compreensão, carinho e muito amor.

Ao Celso pelo apoio, possibilitando discussões bastante proveitosas. Também não poderia deixar de agradecer a Cris, pelos bate-papos que sempre resultaram em boas dicas. Aliás, discussões e bate-papos proveitosos não faltaram em meio aos colegas de laboratório. Entre eles estão o Daniel e Marcelo - grandes amigos - , Joana, Fran, Val, Cris (Alexandre), Lu, Alexandre, Rodrigo, Arce, Álvaro, Marcão, Moacir e Cláudio. Juntos convivemos num ambiente agradável.

Agradeço ainda ao Walcir, Luciana, Fabiana, Rodrigo e Beto, atentos na manutenção da rede, equipamentos do laboratório e ajuda aos usuários.

A todos do *densis* e *cose*, pela amizade e companheirismo demonstrada, proporcionando um gostoso local de trabalho; ao Grupo de Jovens Raio de Luz pela amizade e orações, e a todos que direta ou indiretamente participaram ou estiveram ao meu lado.

Índice

Apresentação.....	01
Capítulo 01: O Sistema de Energia Elétrica	04
1.1 Introdução	04
1.2 Sistema de Energia Elétrica	04
1.3 Sistema de Distribuição	05
1.4 Cargas	08
1.5 Estados do Sistema de Distribuição	10
1.6 Perdas de Energia Elétrica e Reconfigurações de Redes.....	11
1.7 Abordagens para Minimização de perdas	13
1.7.1 Abertura seqüencial de chaves	13
1.7.2 Troca de Ramos (branch - exchange)	14
1.7.3 Otimização Tradicional (Programação Matemática)	15
1.7.4 Computação Evolutiva (Algoritmos Genéticos).....	15
1.7.5 Redes Neurais	16
1.7.6 Sistemas Especialistas.....	16
1.7.7 Buscas Informadas	17
1.7.8 Considerações Finais	18
Capítulo 02: Modelo Matemático e Formulação do Problema	19
2.1 Introdução	19
2.2 Componentes do Sistema de Distribuição	19
2.3 Representação do Sistema de Distribuição	20
2.4 Formulação Matemática para o Problema	23
2.5 Comentários	26

Capítulo 03: GRASP	27
3.1 Introdução	27
3.2 Heurísticas	27
3.3 GRASP	28
3.4 Exemplo de Funcionamento do Método.....	32
Capítulo 04: Redução de Perdas pelo Método GRASP	38
4.1 Introdução	38
4.2 Buscas Informadas	38
4.3 GRASP para Redução de Perdas em Redes de Distribuição	40
4.4 Gradiente Reduzido para Fluxos em Redes.....	41
4.5 Busca Local	44
Capítulo 05: Estudo de Casos	48
5.1 Introdução	48
5.2 Ilustração do Algoritmo para Redução de Perdas	48
5.3 Casos Estudados	55
5.3.1 Rede 'Baran e Wu'.....	55
5.3.2 Rede 47	57
5.3.3 Rede 'pBauru'	59
Capítulo 06: Conclusões	67
Sugestões	68
Referências Bibliográficas	70
Apêndice	75
Apêndice 1	75
Apêndice 2	76
Apêndice 3	77

Apresentação

Os sistemas de distribuição de energia elétrica devem operar com elevados níveis de qualidade e com um menor custo possível. As perdas de energia são indesejáveis.

Estima-se que 7% de toda a energia elétrica gerada em sistemas de potência é perdida, sendo 2% na transmissão e 5% na distribuição (Bunch *et al*,1982). O problema de minimização de perdas procura encontrar uma configuração da rede, onde o montante das perdas seja reduzido.

Este trabalho propõe um método para encontrar configurações com menores valores de perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica, através de modificações dos estados da rede, por chaveamentos.

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 por Merlin e Back (1975). Esses autores apresentaram duas alternativas para abordagem do problema. 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 da rede; 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.

Através da obtenção de redes com menores valores para as perdas, além da economia de energia, outros aspectos positivos foram detectados pelos autores, tais como: obtenção de uma boa distribuição de cargas entre os alimentadores, adiamento da necessidade de investimentos em expansão das redes e maior robustez

em relação a falhas, ou seja, diante de emergências, um pequeno número de chaveamentos pode restaurar o suprimento de energia a áreas escuras.

Recentemente, foi proposta uma abordagem que encontra soluções ótimas globais (Cavellucci e Lyra, 1997). A estratégia utiliza um procedimento recursivo de duas etapas, combinando as técnicas de otimização não linear de fluxos (Lyra e Tavares, 1988) e estratégias de busca formal usadas na área de inteligência artificial (Pearl, 1994).

Este trabalho faz a união da estrutura desenvolvida por Cavellucci e Lyra (1997), com conceitos do método *Greedy Randomized Adaptive Search Procedures* (Feo and Resende, 1995), para avançar na possibilidade de tratar redes de grande porte. No restante deste trabalho, denominaremos o método *Greedy Randomized Adaptive Search Procedures* de "GRASP", termo normalmente utilizado na literatura de otimização combinatória.

O GRASP é um método heurístico que utiliza uma fase de construção aliado a uma busca local. Ou seja, constrói-se uma solução de operação e, a seguir, procura-se uma outra melhor, na vizinhança da solução construída. Não é garantido que a abordagem encontre uma solução ótima global, porém ela permite obter boas soluções em redes de grande porte.

Na abordagem proposta, inicialmente, relaxa-se a restrição de operação radial da rede de distribuição e encontra-se uma solução ótima para o problema com a rede contendo ciclos. A solução encontrada é denominada "solução otimista" (limitante inferior) para o problema com a restrição de radialidade.

Informações sobre os fluxos na rede obtidas na solução otimista guiam a fase de construção do método GRASP. A busca local do método GRASP é realizada com um procedimento de troca de ramos, proposto por Civanlar e co-autores (1988). Neste trabalho utilizou-se a implementação proposta por Baran e Wu (1989).

A solução deste problema deve fornecer uma configuração radial para a operação da rede de distribuição cujas perdas sejam menores, atenda a demanda de energia e respeite as restrições de limites de queda de tensão e corrente nas linhas.

O Trabalho está organizado na forma a seguir.

No Capítulo 1 (**O Sistema de Energia Elétrica**) é descrito o sistema de energia elétrica, dando ênfase ao sistema de distribuição, onde acontece a maior parte das perdas de energia elétrica.

No Capítulo 2 (**Modelo Matemático e Formulação do Problema**) são mostradas a representação em forma de grafo para o sistema de distribuição de energia elétrica e a formulação do problema de minimização das perdas de energia.

No Capítulo 3 (**GRASP**) apresenta-se um breve comentário sobre heurísticas e descreve-se detalhadamente o método *Greedy Randomized Adaptive Search Procedures* (GRASP), com uma ilustração de sua aplicação.

No Capítulo 4 (**Redução de Perdas pelo Método GRASP**) apresenta-se a estratégia de solução, detalhando-se a especialização do método GRASP para o problema de redução de perdas (aliado a buscas informadas). Apresenta-se também o método do gradiente reduzido para fluxos em redes, com função objetivo não linear, e a busca local por troca de ramos.

No Capítulo 5 (**Estudo de Casos**) apresenta-se os testes e resultados obtidos com a aplicação do algoritmo a redes de distribuição.

No Capítulo 6 (**Conclusões**) apresenta-se comentários finais, conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

Em **Apêndices** apresenta-se o fluxograma para a redução de perdas utilizando o método GRASP, ilustra-se como deve ser os dados de entrada para o programa de redução de perdas e finalizando, apresenta-se dados de parte da rede de Bauru, utilizada neste trabalho.

Capítulo 01

O Sistema de Energia Elétrica

1.1 Introdução

Este capítulo apresenta o sistema de energia elétrica, também conhecido como sistema de potência, e a localização do sistema de distribuição de energia dentro do mesmo, descrevendo-o com mais detalhes. Perdas de energia ocorrem em todo o sistema, porém elas são maiores no Sistema de Distribuição. A partir de 1975 surgiram metodologias para o tratamento desse problema, através de reconfigurações das redes. Algumas dessas metodologias são apresentadas neste capítulo.

1.2 Sistema de Energia Elétrica

Os sistemas de energia elétrica podem ser divididos em três grandes partes: geração, transmissão e distribuição. A geração de energia é realizada nas centrais elétricas (como usinas hidrelétricas), que transformam a energia primária (energia hidráulica, por exemplo) em energia motriz e, a seguir, em energia elétrica. A energia elétrica passa por uma subestação elevadora, onde eleva-se a tensão e inicia-se a transmissão, que transporta a energia entre o centro produtor e os centros consumidores – níveis de tensões altos permitem reduzir perdas e viabilizam o transporte de grandes blocos de energia. Ao chegar aos centros consumidores, a energia passa por subestações abaixadoras, onde as tensões são reduzidas. Os

sistemas de distribuição são compostos por todos os equipamentos e acessórios instalados a partir das subestações abaixadoras até os pontos de consumo.

O diagrama da Figura 1.1 mostra simplificada um sistema de energia elétrica (sistema de potência), contendo a geração, a transmissão e a distribuição.

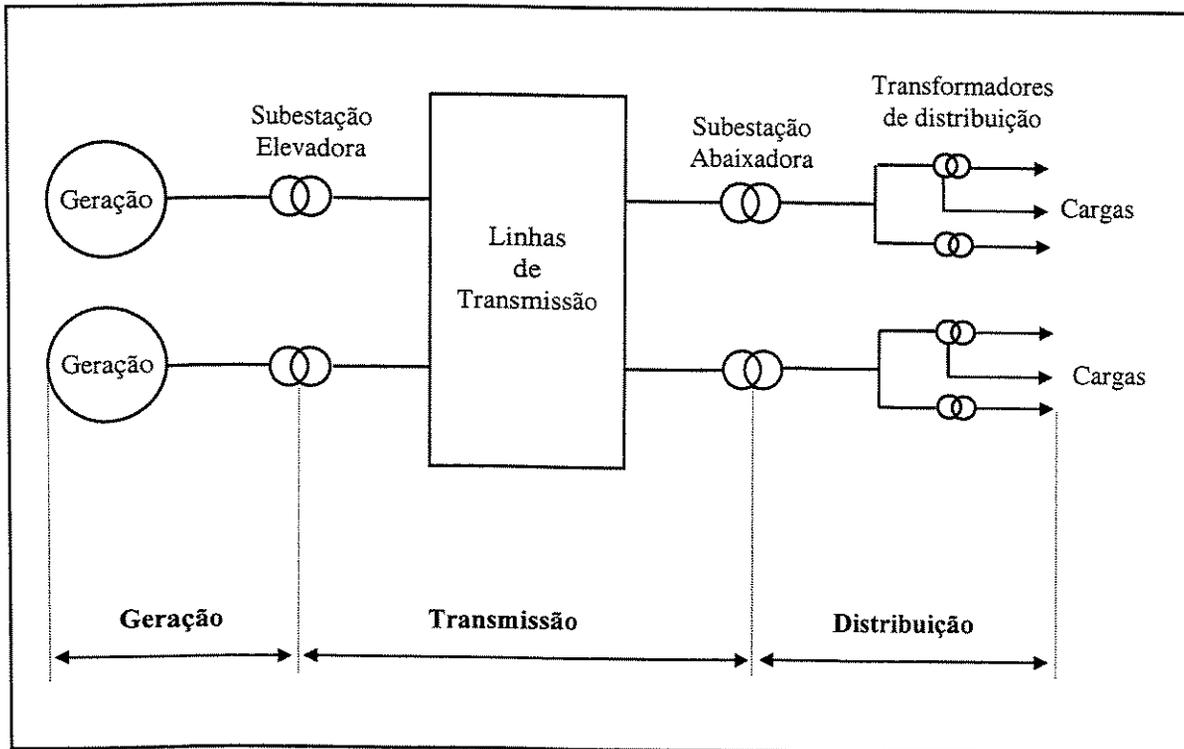


Figura 1.1: Sistema de Energia Elétrica.

Um sistema de energia elétrica deve fornecer adequadamente as necessidades de energia em todos os pontos de carga (pontos de consumo de energia). A adequação do fornecimento é caracterizada por indicadores de qualidade, como o fornecimento de energia aos pontos de carga de maneira contínua, constância na frequência e tensão. Deseja-se também fornecer energia com o menor custo possível e baixo impacto ambiental.

1.3 Sistema de Distribuição

O sistema de distribuição é usualmente dividido em rede primária e rede secundária. A rede primária consiste dos componentes ligados entre o barramento da subestação abaixadora e o primário dos transformadores de distribuição. Os componentes entre o secundário desses transformadores e os consumidores formam a rede secundária.

A Figura 1.2 ilustra um sistema de distribuição e seus subsistemas primários e secundários.

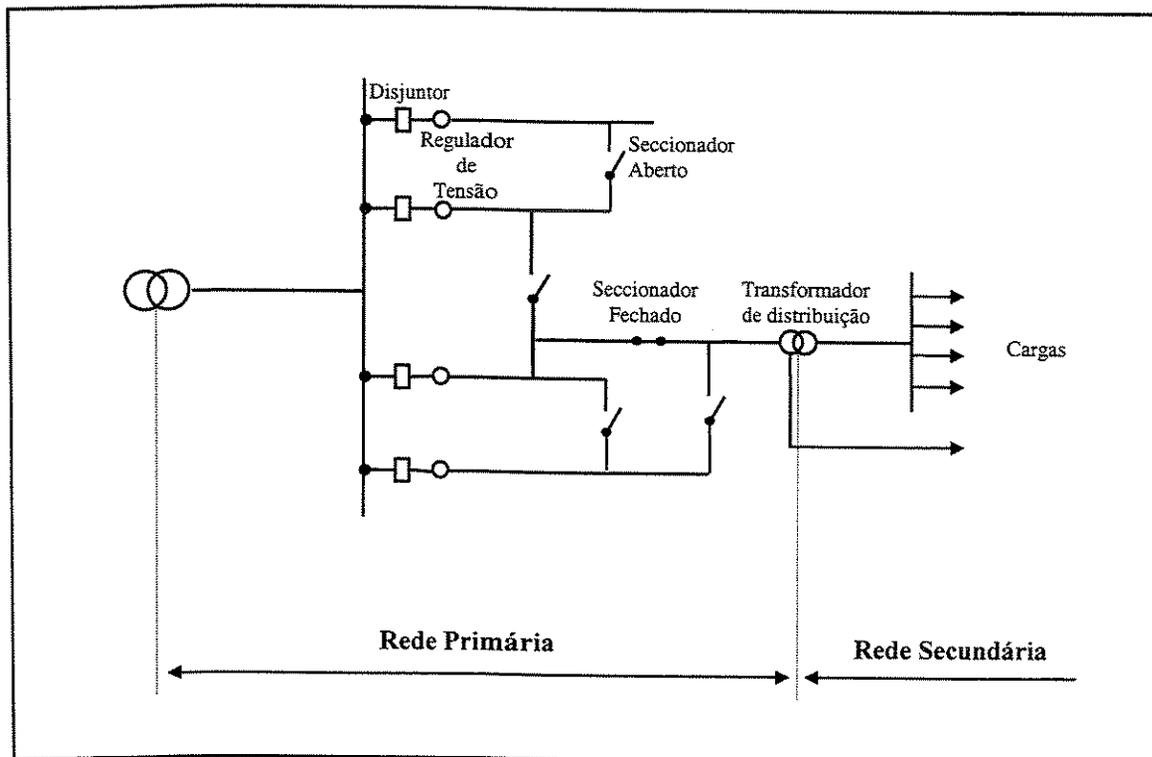


Figura 1.2: Sistema de Distribuição.

A rede primária é composta de alimentadores e equipamentos de manobra, proteção, correção e transformação.

- Os alimentadores são constituídos por condutores de energia (cabos ou linhas), que partem da subestação abaixadora, com a finalidade de alimentar os transformadores de distribuição.

- Os equipamentos de manobra têm a finalidade de possibilitar manobras para transferência de cargas, aberturas e fechamentos de circuitos (gerenciamento da rede).
- Os equipamentos de proteção (chave fusível, disjuntores, religadores e chave seccionadora) devem proteger a rede e seus componentes. Eles funcionam em coordenação, de maneira que quando houver um defeito seja desligado o equipamento mais próximo.
- Os equipamentos corretivos podem ser de tensão ou de fator de potência. Os equipamentos corretivos de tensão, denominados "reguladores de tensão", têm por finalidade manter na carga um nível de tensão estabelecido previamente. Os equipamentos corretivos de fator de potência são bancos de capacitores, com finalidade de fornecer potência reativa nos pontos onde for necessário, possibilitando redução de perdas nos condutores, redução da queda de tensão e liberação da capacidade dos condutores e equipamentos.
- Os transformadores de distribuição se localizam nos postes de transformação, juntamente com chaves fusíveis e pára-raios, com a finalidade de abaixar a tensão dos alimentadores ao nível de utilização dos consumidores.

A rede secundária é formada pelo conjunto de condutores destinados ao transporte da energia dos transformadores de distribuição até os pontos de carga (pontos de consumo de energia).

A operação usual de um sistema de distribuição é da forma radial, ou seja, não se permite anéis (ciclos). A configuração radial visa adequar o custo e requisitos de proteção para a operação da rede. Os alimentadores, no entanto, podem ser conectados a seus vizinhos através de chaves de interligação, normalmente abertas.

As chaves normalmente abertas aumentam a confiabilidade do sistema, possibilitando alternativas para isolamento de falhas. Permitem também mudanças de

configuração com o objetivo de energizar áreas isoladas em decorrência de defeitos e reduzir perdas.

Uma rede operando em uma configuração de poucas perdas tem também uma melhor distribuição dos fluxos de potência nos alimentadores, o que aumenta a vida útil dos equipamentos e melhora o perfil de tensão na rede. Ou seja, a redução de perdas tem também impacto positivo na melhora de qualidade da energia fornecida.

Os modelos matemáticos que representam a rede de distribuição de energia elétrica são similares aos modelos que representam a rede de transmissão, tendo como principal diferença a restrição de operação radial da rede de distribuição. A característica de operação radial aumenta significativamente o grau de complexidade do problema de redução de perdas.

1.4 Cargas

Carga é todo dispositivo que consome energia elétrica do sistema. As cargas podem ser classificadas como industriais, comerciais, residenciais e "outras". Motores elétricos, equipamentos de aquecimento, equipamentos de refrigeração, equipamentos de iluminação e equipamentos eletrônicos são exemplos típicos de cargas elétricas.

As cargas industriais são predominantemente de natureza indutiva (motores elétricos, por exemplo), o que acarreta o aumento da potência reativa. Essa potência, além de não produzir trabalho, aumenta a queda de tensão ao longo dos alimentadores, tendo como conseqüências a diminuição da qualidade do fornecimento, o comprometimento da capacidade máxima de fluxo nos condutores e o aumento de perdas resistivas. Devido a estes inconvenientes, existem legislações que controlam a relação entre a potência ativa e a potência aparente para cada cliente

- esta relação é denominada fator de potência. O fator de potência pode ser melhorado através da utilização de capacitores instalados nas proximidades das cargas indutivas.

A Tabela 1.1 (Eletrobrás, 1999) mostra o consumo de energia elétrica em GWh de cada classe de consumidores. Apresenta também o consumo total do mercado brasileiro, em 12 meses nos anos de 1998 e 1999.

Classes	Consumo por Classes - GWh	
	1998	1999
Residencial	75.057	79.566
Industrial	121.992	121.467
Comercial	38.863	41.894
Outras	39.676	42.195
TOTAL	275.518	285.122

Tabela 1.1: Consumo de Energia Elétrica do Mercado Brasileiro.

Os diversos tipos de cargas, supridos pelos sistemas de distribuição, têm seus valores alterados ao longo de cada dia, fazendo com que uma configuração com poucas perdas para um determinado momento, eventualmente não mantenha esta propriedade para algum tempo mais tarde. Logo, o problema de redução de perdas deve ser resolvido diversas vezes no decorrer do dia, o que reforça a necessidade de algoritmos rápidos para se obter uma configuração com poucas perdas.

A Figura 1.3 apresenta uma curva típica de carga para ilustrar a sua variação ao longo de um dia. Esta curva corresponde à carga do Estado de São Paulo (Lima, 1996), com base na leitura realizada no dia 01/11/97.

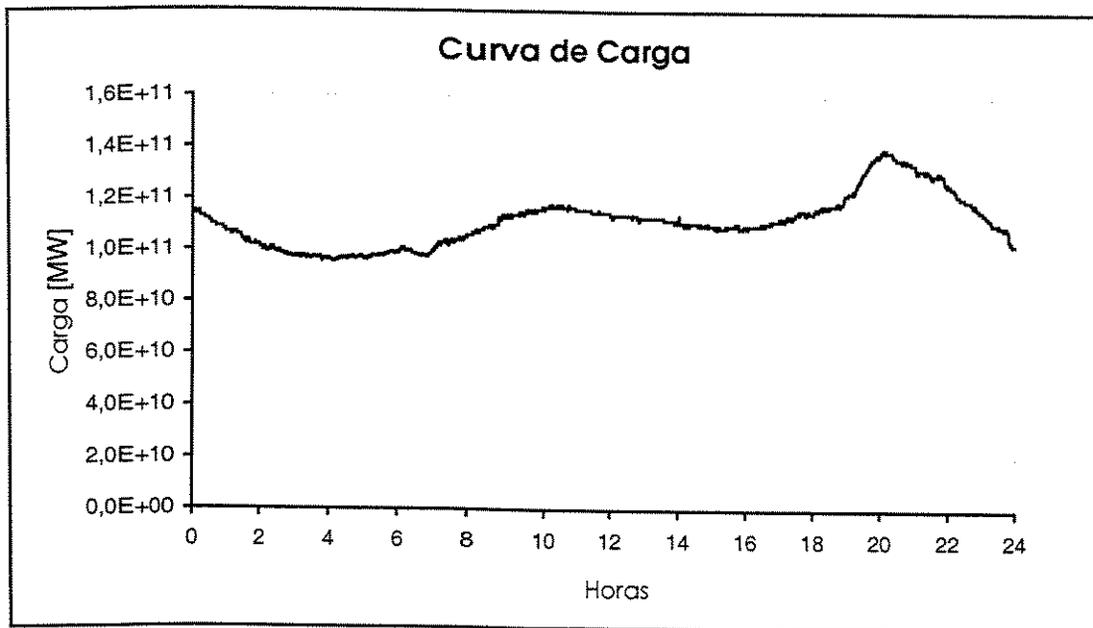


Figura 1.3: Exemplo de Curva de Carga Típica.

1.5 Estados do Sistema de Distribuição

Os sistemas de distribuição podem operar em três estados distintos: emergência, restauração e normal. Quando uma ou mais falhas ocorrem na rede e os limites de tensão e corrente não são mais satisfeitos, a rede está em estado de emergência. Após a identificação do defeito, isola-se a área atingida pela falha e a rede passa a operar em estado de restauração. Quando todas as restrições da rede estão satisfeitas, a rede está operando em estado normal.

No estado de emergência, o sistema de proteção (disjuntores ou religadores) isolará o alimentador envolvido, visando evitar acidentes e a propagação do defeito para outras áreas da rede. Com isso, evita-se também a degradação dos equipamentos.

No estado de restauração, com a área atingida pela falha isolada através de chaveamentos, procura-se restabelecer o fornecimento de energia para o maior número possível de consumidores. O próximo passo é localizar o equipamento com

defeito para realizar a manutenção ou substituí-lo. Procura-se diminuir ao máximo o tempo de indisponibilidade do sistema, visando garantir a qualidade do serviço.

No estado normal, mesmo com as restrições satisfeitas, é desejável aumentar a eficiência do sistema, diminuindo seu custo de operação, aumentando sua confiabilidade (disponibilidade e qualidade de serviço) e segurança (robustez do sistema em relação a possíveis ocorrências de defeitos). Reconfigurar a rede para operar com perdas reduzidas é umas das formas para obter esses requisitos.

1.6 Perdas de Energia Elétrica e Reconfigurações de Redes

Em sistemas de energia elétrica, desde a transmissão até a distribuição, continuamente ocorre dissipação de energia (perdas de energia), devido à resistência elétrica nas linhas e nos equipamentos. A energia elétrica é dissipada em energia calorífica, fenômeno conhecido por Efeito Joule, ou perdas resistivas.

As perdas totais nos sistemas de energia elétrica são normalmente estimadas em 7%, sendo 2% na transmissão e 5% na distribuição (Bunch *et al*,1982). No Brasil, as perdas superam estes índices e são de aproximadamente 15 % da energia total produzida (Cavellucci,1999), sendo 7 % na transmissão e 8 % na distribuição.

Ainda podemos dividir as perdas totais em comerciais e técnicas. As perdas comerciais correspondem à energia entregue ao consumidor, mas não computada no faturamento das concessionárias. As perdas técnicas são as perdas no transporte e em equipamentos da rede. Este trabalho concentra-se na redução de perdas resistivas técnicas.

Reconfiguração de rede é o processo de alterar a configuração da rede através de fechamentos e aberturas de chaves instaladas ao longo dos alimentadores da rede primária.

1.7 Abordagens para Minimização de Perdas

Os precursores na redução de perdas técnicas na operação de redes de distribuição de energia elétrica através de reconfiguração de redes foram os engenheiros da “*Electricité de France (EDF)*” Merlin e Back (1975). A partir de seus resultados promissores, muitos outros trabalhos foram desenvolvidos.

As abordagens para a redução de perdas no sistema de distribuição de energia elétrica diferem basicamente em relação às estratégias utilizadas na solução do problema.

Na revisão da literatura, para o problema de redução de perdas através de reconfigurações, a maioria dos autores separa as estratégias em métodos de otimização, métodos que combinam heurísticas e otimização e métodos heurísticos (Sarfi *et al*, 1994; Augularo *et al*, 1995). No entanto, na discussão a seguir, procura-se classificar as abordagens para resolver o problema de redução de perdas por características que permitam realçar suas especificidades do ponto de vista de implementações.

1.7.1 Abertura Seqüencial de Chaves

Abertura Seqüencial de Chaves é o processo no qual, numa primeira etapa, fecha-se todas as chaves e obtém-se uma solução de mínimas perdas para a rede com ciclos. Numa segunda etapa, remove-se um ciclo pela abertura da chave com o menor fluxo de potência na solução de mínimas perdas. As etapas são repetidas sucessivamente, até a obtenção de uma solução radial.

Os procedimentos de abertura seqüencial de chaves derivam do método aproximado proposto por Merlin e Back (1975). Normalmente, são considerados como “mistura” de otimização e heurística (Sarfi *et al*, 1994). As idéias propostas por Merlin e Back foram aperfeiçoadas por Shirmohammadi e Hong (1989). Essencialmente, os

aperfeiçoamentos foram a utilização de fluxo de carga onde são consideradas as energias reativas e acompanhamento do atendimento às restrições de fluxos máximos e quedas de tensões, durante o processo de abertura seqüencial de chaves.

Muitos autores implementaram, testaram e aperfeiçoaram a abordagem por abertura seqüencial de chaves, seguindo a trilha aberta por Merlin-Back e Shirmohammadi-Hong (Wagner *et al.*, 1991; Peponis *et al.*, 1995 e 1996; Borozan *et al.*, 1997; Lin e Chin, 1998). Normalmente, ressalta-se como aspecto positivo da abordagem o fato de que a obtenção de uma solução de poucas perdas independe de configurações radiais já conhecidas para operação da rede.

1.7.2 Troca de Ramos (branch - exchange)

O método de troca de ramos, proposto inicialmente por Civanlar e co-autores (1988), é provavelmente a alternativa mais utilizada para reduzir perdas em sistemas de distribuição. É um procedimento que tem início em uma configuração radial da rede de distribuição, seguido de reconfigurações realizadas pela abertura e fechamento de chaves (trocas de ramos), sem perda da estrutura radial do sistema. Perdas resistivas são reduzidas através dessas trocas, até que não seja mais possível melhorar a solução.

Baran e Wu (1989) aprimoraram o trabalho Civanlar e co-autores através da implementação de uma busca mais elaborada. Introduziram também novas expressões de aproximação para o cálculo dos fluxos de carga em redes radiais.

Castro e Watanabe (1990) e Jasmon e co-autores (1991) propuseram, respectivamente, pequenas modificações nas abordagens de Civanlar e co-autores (1988) e Baran e Wu (1989). Goswami e Basu (1992) seguiram a mesma linha dos demais trabalhos por troca de ramos.

1.7.3 Otimização Tradicional (Programação Matemática)

Merlin e Back (1975) foram os primeiros autores a proporem 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.

Outros trabalhos que procuraram usar técnicas de otimização tradicional incluem Glamocanin (1990), Wagner e co-autores (1991), que linearizaram a função de perdas para poderem estudar o problema através de programação linear. Chen e Cho (1993) formularam o problema de redução de perdas para programação inteira.

1.7.4 Computação Evolutiva (Algoritmos Genéticos)

Denomina-se "computação evolutiva" a procedimentos para solução de problemas através de "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". Nara e co-autores (1992) foram pioneiros na abordagem de minimização de perdas em sistemas de distribuição por computação evolutiva.

Monclar e co-autores (1997) utilizaram juntamente com computação evolutiva regras para redução do número de configurações a serem testadas. Recentemente Costa (1999) propôs inovações para resolver problemas de infactibilidade de soluções, presentes na abordagem de Nara.

O principal elemento da busca, no trabalho de Costa (1999), foram os Algoritmos Genéticos, porém, como esses algoritmos tendem a levar a ótimos locais, foi implementada diversificação inspirada em estratégias de Busca Tabu. Costa explora também a união de algoritmos genéticos com busca local por troca de ramos.

1.7.5 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 e co-autores (1993) e, recentemente, por Gauche e co-autores (1999). Ambos os trabalhos obtiveram resultados satisfatórios em exemplos simples.

1.7.6 Sistemas Especialistas

Sistemas especialistas são procedimentos para a 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.

Liu e Lee (1987) utilizaram sistemas especialistas para resolver o problema de perdas em redes de distribuição, baseado em duas premissas, verificadas sobre um par de alimentadores vizinhos (alimentadores que possuam chaves abertas em comum).

Taylor e Lubkerman (1990) trataram o problema de redução de perdas guiados por regras adotadas em procedimento de busca. Esta abordagem, além de buscar uma configuração radial para a rede de distribuição de energia elétrica com menores

valores para as perdas, objetiva evitar a sobrecarga nos transformadores e alimentadores, e impedir a violação dos níveis de tensão nos barramentos.

1.7.7 Buscas Informadas

Cavellucci e Lyra (1997) apoiaram-se na união de técnicas para otimização de fluxos em redes com funções não lineares aliadas a 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 redes radiais de distribuição. As abordagens de buscas informadas desenvolvidas por Cavellucci e Lyra podem ser vistas como sínteses dos métodos de abertura seqüencial de chaves e troca de ramos, mas com limitações para a minimização de perdas em redes grandes.

Três métodos de busca 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 e 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.

Essa metodologia ampliou as possibilidades de encontrar soluções ótimas globais para o problema de minimização de perdas, mas encontra limites no tratamento de redes de grande porte. Tão e co-autores (1999) realizaram estudos sobre alternativas de utilização de processamento paralelo nas buscas informadas.

Esses estudos permitiram reduzir o tempo de processamento e aumentar o tamanho das redes tratadas; no entanto, ainda não é possível garantir a obtenção de configurações ótimas para redes grandes.

1.7.8 Considerações Finais

Abordagens com melhores êxitos foram as que trataram o problema com métodos aproximados. Destaca-se os procedimentos de *Abertura Seqüencial de Chaves* (Merlin and Back, 1975 e Shirmohammadi and Hong, 1989), e os métodos de *Troca de Ramos (branch-exchange)* (Civanlar et al 1988).

A busca *backtracking heurístico*, método por buscas informadas que forneceu os melhores resultados, considera todas as possibilidades de acionamento de chaves para a abertura de ciclos. Essa busca, foi o ponto de partida deste trabalho, que concentra a busca em um conjunto "promissor" de chaves. Conceitos do método GRASP são utilizados para refinar a busca, caracterizando um compromisso adequado entre otimalidade e custo de processamento e visando avançar na possibilidade de tratar redes de grande porte.

O método GRASP estabelece uma solução a partir de uma fase de construção e procura melhorá-la por busca local, numa segunda fase. Na metodologia desenvolvida neste trabalho, a fase de construção faz a reconfiguração da rede de distribuição levando em conta apenas a potência ativa. Na fase de busca local, a reconfiguração é realizada por troca de ramos, considerando-se tanto a potência ativa como a reativa.

Capítulo 02

Modelo Matemático e Formulação do Problema

2.1 Introdução

Este capítulo apresenta o modelo de grafos para sistemas de distribuição de energia elétrica e uma formulação do problema de minimização de perdas através de reconfigurações.

2.2 Componentes do Sistema de Distribuição

As redes de distribuição de energia elétrica podem ser sintetizadas, para abordagem do problema de redução de perdas resistivas (perdas técnicas), pelos seguintes elementos:

- blocos de carga (BC), onde estão agrupados os consumidores de energia;
- linhas elétricas (L);
- seccionadores e disjuntores, denominados de chaves (CH);
- subestações (SE).

Esses componentes estão representados na Figura 2.1, que ilustra uma rede de distribuição primária.

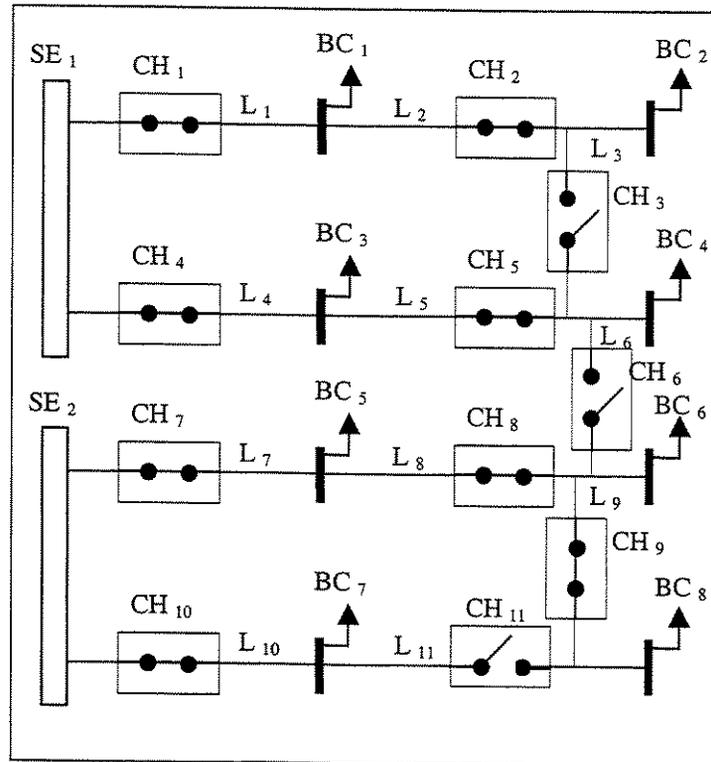


Figura 2.1: Rede de distribuição primária.

2.3 Representação do Sistema de Distribuição

Utiliza-se uma representação por grafos (Ahuja *et al.*, 1993) para as redes de distribuição de energia elétrica. Esta representação é conveniente, porque é muito intuitiva e torna possível implementar algoritmos eficientes.

Um grafo $G = (\mathcal{N}, \mathcal{A})$ é definido pelo par de conjuntos \mathcal{N} e \mathcal{A} , onde \mathcal{N} é um conjunto finito não vazio de pontos (denominados nós) e \mathcal{A} é um conjunto de pares de elementos distintos de \mathcal{N} (esses pares são denominados arcos). A Figura 2.2 ilustra um exemplo de grafo, onde se apresenta o conjunto de nós e também o conjunto de arcos desse grafo.

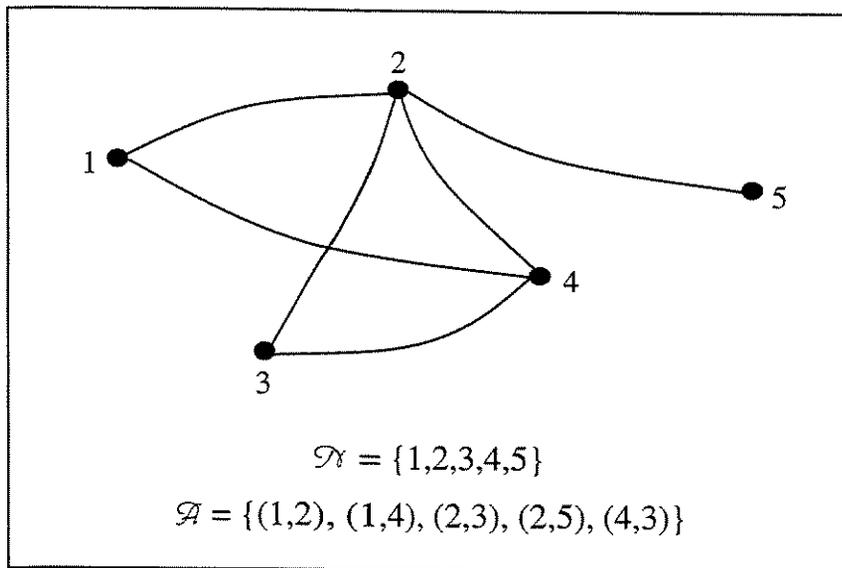


Figura 2.2: Exemplo de Grafo.

Um caminho do nó n_1 ao nó n_k é uma sequência de nós n_1, \dots, n_k , tal que (n_j, n_{j+1}) pertence a \mathcal{A} , $1 \leq j \leq |k-1|$. Um caminho de k -nós é formado por $k-1$ arcos e o valor $k-1$ é o comprimento do caminho. Um grafo $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{A})$ é conexo quando existe um caminho "entre cada par" de vértices de \mathcal{G} . Caso contrário, \mathcal{G} é desconexo.

O ciclo em um grafo é um caminho $n_1, n_2, \dots, n_k, n_{k+1}$, onde $n_1 = n_{k+1}$ e $k \geq 3$. Quando um grafo não possui ciclos ele é chamado de grafo acíclico. Uma árvore é um grafo acíclico e conexo. Estes aspectos são ilustrados na Figura 2.3.

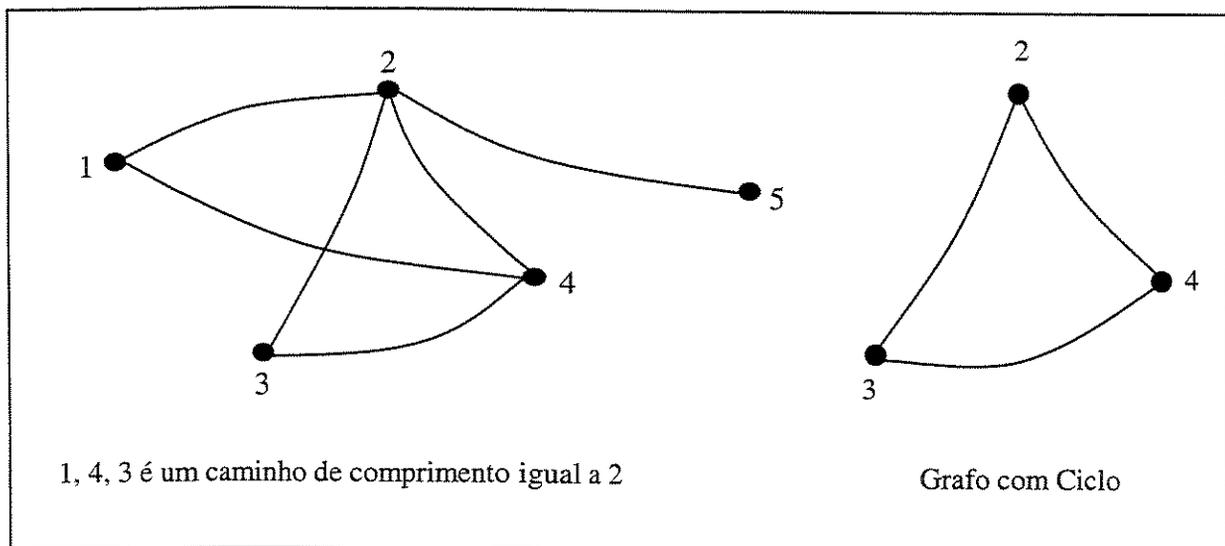


Figura 2.3: Caminho e Comprimento de um Grafo e Grafo com Ciclo.

A Figura 2.4 mostra uma representação em forma de grafo para uma rede de distribuição de energia elétrica esquematizada na Figura 2.1. No conjunto \mathcal{N} (nós) temos os blocos de carga ou subestações (e um nó raiz, \mathcal{R} , é também incluído para evitar dificuldades no tratamento da conectividade da rede). No conjunto \mathcal{A} (arcos) temos as linhas e os seccionadores da rede, que podem ser todo tipo de chaves e disjuntores, exceto aqueles que conectam a subestação ao nó raiz, que podem ser identificados como sendo a rede de transmissão.

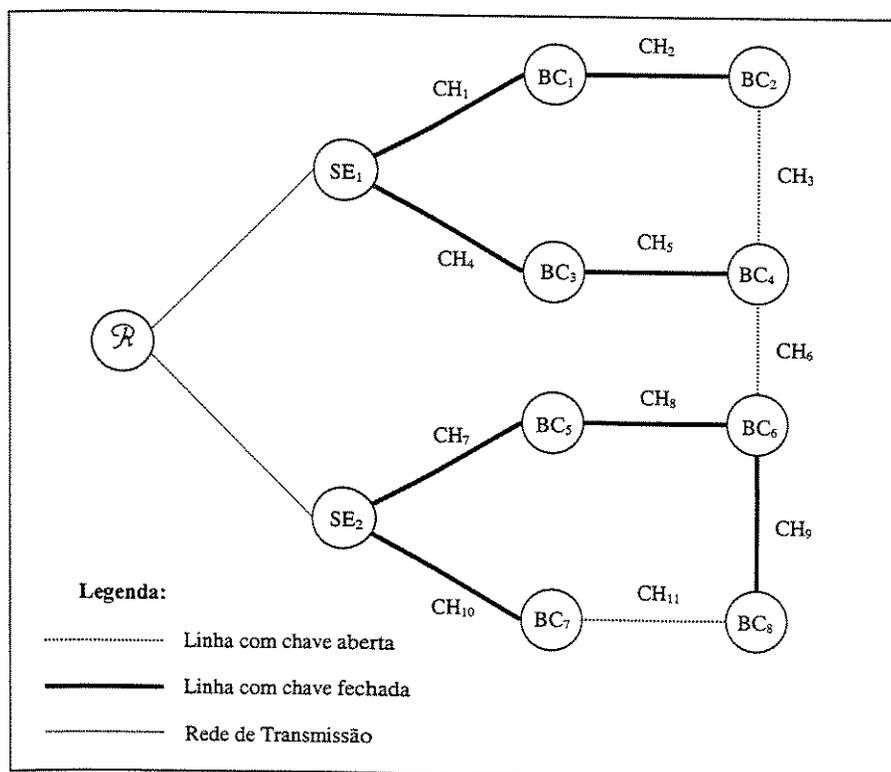


Figura 2.4: Modelo de rede de distribuição em forma de grafo.

Como a estrutura da rede de distribuição é usualmente radial, ela pode ser denominada uma estrutura em árvore. Encontrar a configuração com mínimas perdas é equivalente a resolver o problema de determinação da árvore de custo mínimo (Ahuja *et al*, 1993). No entanto, ressalta-se que o problema de redução de perdas é um problema com custo variável.

A restrição de operação radial do sistema de distribuição impõe que exista apenas um caminho energizado entre qualquer nó e a raiz (\mathcal{R}). As chaves abertas não participam dos caminhos energizados – ou seja, não participam da árvore correspondente a uma determinada configuração.

2.4 Formulação Matemática do Problema

Em termos apenas descritivos, podemos definir o problema (\mathcal{P}) de minimização de perdas elétricas no sistema de distribuição de energia como:

\mathcal{P}

Minimização de Perdas Elétricas

s.a: *Suprimento de Demanda;*
Limites do Fluxo;
Operação Radial.

A função objetivo que se deseja minimizar, representa as perdas elétricas (perdas resistivas por Efeito Joule) em cada linha energizada do sistema de distribuição. Supondo o sistema de distribuição representado por um grafo com n arcos, a função objetivo pode ser representada pela Equação (2.1).

$$\text{Min} \sum_{k=1}^n r_k * x_k^2 \quad (2.1).$$

Nesta equação, n é o número total de arcos, r_k representa a resistência ôhmica no arco k e x_k representa o fluxo de corrente neste mesmo arco k .

As restrições de balanço de corrente nos nós, correspondentes à Primeira Lei de Kirchhoff, podem ser condensadas na Equação matricial (2.2).

$$A * x = b \quad (2.2).$$

Onde: A representa a matriz de incidência nó-arco (Ahuja *et al*, 1993) do grafo que representa o sistema de distribuição, x representa o vetor dos fluxos de corrente e b representa o vetor de carga nos nós ou corrente injetada no nó origem.

Nos nós correspondentes às subestações tem-se $b_i > 0$; nos nós que correspondem aos blocos de carga tem-se $b_i < 0$; nos nós de passagem tem-se $b_i = 0$. Supõe-se que a injeção de corrente na rede é igual a corrente necessária para abastecer todas as cargas nos nós. Como representado na Equação (2.3).

$$\sum b_i = 0 \quad (2.3).$$

Deve-se também satisfazer a restrição de capacidade física das linhas do sistema de distribuição, em relação ao fluxo de corrente (segunda restrição), caracterizada pela Equação (2.4).

$$\underline{x} \leq x \leq \overline{x} \quad (2.4).$$

A terceira e última condição (restrição) é a operação radial do sistema de distribuição, representada pela Equação (2.5).

$$G' = (\mathcal{N}, \mathcal{A}') \text{ é uma árvore} \quad (2.5).$$

Onde: \mathcal{A}' é o conjunto de arcos com fluxo diferente de zero (correspondentes as chaves fechadas) e \mathcal{N} é o conjunto de todos os nós do grafo que representa a rede de distribuição de energia elétrica.

Pode-se mostrar facilmente (Ahuja *et al*, 1993) que numa configuração de operação que satisfaça a restrição de radialidade, o número de arcos na árvore energizada é $n-1$. Consequentemente, o número de arcos fora da árvore energizada (c_a) é representado pela Equação (2.6).

$$c_a = a - n + 1 \quad (2.6).$$

Onde: a é o número de arcos no conjunto \mathcal{A} e n é o número de nós no conjunto \mathcal{N} .

Resumindo, o problema de minimização de perdas elétricas em um sistema de distribuição de energia (\mathcal{P}) pode ser caracterizado pelo conjunto de Equações (2.7) a seguir.

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{k=1}^n r_k * x_k^2 \\ \text{S.a:} \quad & A * x = b \\ & \underline{x} \leq x \leq \overline{x} \\ & \mathcal{G}' = (\mathcal{N}, \mathcal{A}') \text{ é uma árvore} \end{aligned} \quad (2.7).$$

Observações:

- 1) As variáveis de decisão são os arcos (chaves) que ficarão abertos, mantendo estrutura em árvore (rede radial).
- 2) Na formulação acima são consideradas apenas as potências ativas; como já mencionado, as potências reativas serão consideradas na fase de busca local.

2.5 Comentários

Os próximos capítulos discutem a estratégia de busca de solução, objetivando encontrar uma solução radial que apresente menores valores para as perdas.

Inicialmente, relaxa-se a restrição de operação radial da rede de distribuição e encontra-se uma solução ótima para o problema com a rede contendo ciclos - denominada "solução otimista", limitante inferior para o problema com a restrição de radialidade. Informações sobre o fluxo de energia na solução otimista guiam o método GRASP, tema do próximo capítulo (*Capítulo 03*).

Capítulo 03

GRASP

3.1 Introdução

Este capítulo apresenta uma rápida discussão sobre heurísticas e descreve o método *Greedy Randomized Adaptive Search Procedures* (GRASP). Apresenta um algoritmo geral para o GRASP e exemplo ilustrativo.

3.2 Heurísticas

Heurística, do grego “*heuriskein*”, significa descobrir. Os dicionários (Aurélio, 1987 e Silveira Bueno, 1985) fornecem as seguintes definições para heurística: “método analítico para o desenvolvimento de verdades científicas” ou “conjuntos de regras e métodos que conduzem à descoberta, à invenção e à resolução de problemas”.

Na área de otimização, heurística é uma denominação geral para técnicas que procuram boas soluções (próximas à ótima), com um custo computacional aceitável. Geralmente, não são capazes de garantir a obtenção de uma solução ótima, ou a quão próxima do ótimo está uma determinada solução encontrada. No entanto, as heurísticas podem ser as únicas alternativas para abordagem de problemas difíceis, para os quais não se conhecem métodos exatos.

Em um breve histórico, as heurísticas surgiram nos anos 50, paralelamente com o método Simplex, mas, nos anos 60, a década dos métodos exatos (como o *Branch-and-Bound*), ficaram no esquecimento. O divisor de águas foi a Teoria da Complexidade nos anos 70, quando as heurísticas ganharam grande interesse.

Em geral, métodos heurísticos são procedimentos mais simples e flexíveis que os métodos exatos. Por isso, são menos exigentes em termos de tempo de execução e ocupação de memória.

Na construção de uma heurística, é necessário encontrar o compromisso entre a qualidade das soluções geradas e o esforço computacional. Pode-se estabelecer algumas características para uma boa heurística:

- capacidade de encontrar soluções de boa qualidade;
- baixa probabilidade de gerar soluções de má qualidade;
- rapidez de processamento;
- simplicidade de implementação;
- ausência de restrições em relação a soluções de partida - se possível, aceitar soluções iniciais ineficazes.

Entre as heurísticas com aplicações bem sucedidas estão Busca Tabu (Glover and Laguna, 1997), *Simulated Annealing* (Kirkpatrick et al, 1983), Algoritmos Genéticos (Goldberg, 1989) e GRASP (Feo and Resende, 1995).

3.3 GRASP

O método GRASP (Feo and Resende, 1995) é a combinação de uma heurística construtiva com uma busca local. Na fase de construção, cria-se uma solução viável, usando conjuntamente uma função gulosa e seleção aleatória (uma função gulosa procura obter o melhor benefício possível a cada passo). Na fase de busca local,

procura-se melhorar a solução construída, investigando-se alternativas em sua vizinhança.

A Figura 3.1 apresenta um código genérico para o método GRASP, no qual as iterações terminam quando algum critério de parada for satisfeito. Na figura $f(s)$ é a função que se deseja minimizar, s^* é a solução inicial e s' é a solução obtida no final do processo.

```
método grasp ( )  
   $f(s^*) \leftarrow +\infty$  ;  
  for i = 1, ..., n do  
    ( a ) Construir uma solução usando um algoritmo  
           guloso aleatorizado ;  
    ( b ) Aplicar um procedimento de busca local a  
           partir de s, obtendo a solução  $s'$  ;  
    ( c ) if  $f(s') < f(s^*)$  then  $s^* \leftarrow s'$  ;  
  end for ;  
end grasp ;
```

Figura 3.1: Código Genérico GRASP.

Na fase de construção, uma solução viável é iterativamente construída, usando-se uma função gulosa para avaliar o benefício de cada novo elemento. A cada iteração da fase de construção, benefícios associados aos elementos são atualizados e cria-se uma lista restrita de candidatos (RCL), formada pelos elementos da melhor avaliação.

O componente probabilístico do GRASP é caracterizado pela seleção aleatória de um elemento da lista restrita de candidatos. A lista de candidatos pode ser restrita por um número máximo de elementos, ou por critério de "qualidade mínima", dos elementos que a compõem.

A seleção aleatória deve ser feita entre os elementos da lista restrita de candidatos. A qualidade média da solução depende da qualidade dos elementos na lista restrita. A diversidade das soluções construídas depende da cardinalidade da lista e da aleatorização controlada.

A Figura 3.2 mostra um pseudo código para a fase de construção de um GRASP, finalizada no momento em que se encontra uma solução.

```
Construção_solução_gulosa_aleatória (Solução)
  Solução = { };
  for Solução não completa do
    ( a ) Construir a Lista Restrita de Candidatos (RCL);
    ( b ) e = Selecionar um elemento aleatoriamente
          (RCL);
    ( c ) Solução = Solução  $\cup$  { e };
    ( d ) Atualizar os benefícios associados aos elementos
          que ainda não participam da solução;
  end for;
end Construção_solução_gulosa_aleatória;
```

Figura 3.2: Pseudo Código da fase de construção GRASP.

As soluções geradas pela fase de construção do GRASP são melhoradas por procedimento de busca local. Um algoritmo de busca local trabalha de maneira iterativa, substituindo sucessivamente a solução atual por uma melhor solução na vizinhança da mesma. A busca termina quando não é mais possível melhorar a solução, na sua vizinhança.

A eficiência da busca local é determinada pela escolha adequada da vizinhança a ser explorada e estruturas de dados. A Figura 3.3 ilustra a forma geral de um algoritmo de busca local, a partir de uma vizinhança N , sendo s a solução inicial.

```
busca_local ( $N(s), s$ )  
  for  $s$  não é um ótimo local do  
    (a) Encontrar uma melhor solução  $t \in N(s)$ ;  
    (b) Fazer  $s = t$ ;  
  end for;  
end busca_local;
```

Figura 3.3: Forma geral de um algoritmo de busca local.

Uma característica atraente do método GRASP é a facilidade com que ele pode ser implementado. Neste método tem-se apenas dois parâmetros a serem ajustados: o número de componentes da lista de candidatos (restritividade da lista) e o número de iterações. Como se trata de um método recente, ainda existe muito o que se explorar para o seu aperfeiçoamento (Díaz *et al*, 1996).

Em um GRASP podem ser utilizados “filtros”. Por exemplo, pode-se aplicar a busca local somente à melhor solução construída através de uma seqüência de aplicações da fase de construção. Outra possibilidade é aplicar a busca local apenas às soluções construídas que satisfazem um determinado limiar de aceitação.

A quantidade de elementos na lista restrita de candidatos (RCL) é também um aspecto a ser explorado no método. Pode-se ainda refinar a seleção aleatória de um elemento da lista, estabelecendo-se probabilidades diferentes para cada elemento, associadas à qualidade dos mesmos.

O GRASP permite implementações simples em processamento paralelo, onde cada processador pode ser inicializado com sua própria cópia do método. Tendo-se n iterações e p processadores, cada processador irá executar (n / p) iterações, havendo necessidade de comunicação entre os mesmos apenas para troca de informações sobre as melhores soluções encontradas.

3.4 Exemplo de Funcionamento do Método

Para ilustrar o funcionamento do método GRASP, será utilizado um problema fictício de otimização combinatória na área de distribuição de energia elétrica.

Dada uma cidade i , com quatro bairros e uma subestação de energia elétrica (SE), conforme representado na Figura 3.4, deve-se suprir a demanda de energia elétrica para todos os bairros da cidade, através de uma estrutura radial da rede de distribuição (rede sem ciclos) e respeitando-se os limites de fluxos nos condutores.

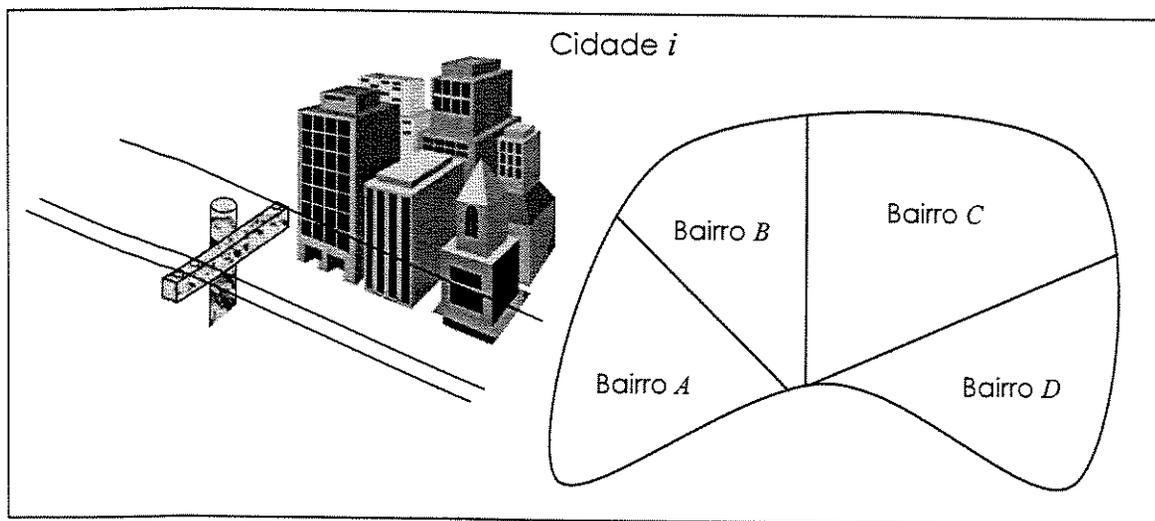


Figura 3.4: Cidade i dividida em Quatro Bairros.

A Figura 3.5 apresenta a rede para suprimento de energia aos bairros, contendo a subestação e as chaves que interligam os bairros.

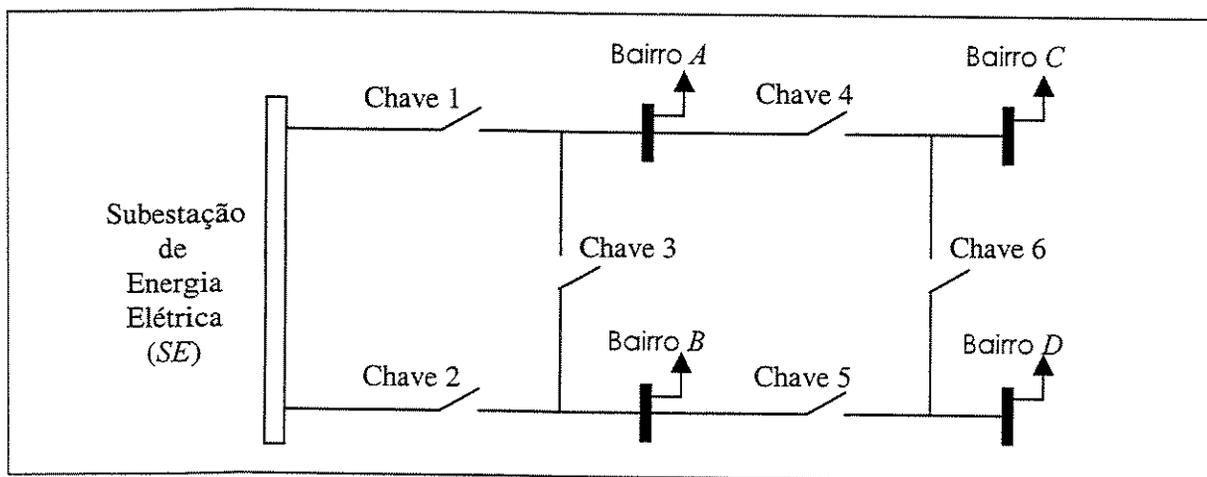


Figura 3.5: Possibilidade de Atendimento de cada Bairro da Cidade.

Com a finalidade de ilustrar cada fase do método GRASP, fixou-se valores de consumo em cada bairro (todos representados na mesma unidade de energia elétrica). Observando a Figura 3.5, nota-se que é possível encontrar diversas configurações que atendam todos os quatro bairros da cidade, com uma configuração sem ciclos.

A Figura 3.6, elaborada a partir da Figura 3.5, mostra uma representação por grafo da rede de distribuição de energia elétrica como apresentado no Capítulo 02. Nesta representação, os arcos são as chaves e os nós são os consumidores dos bairros da cidade.

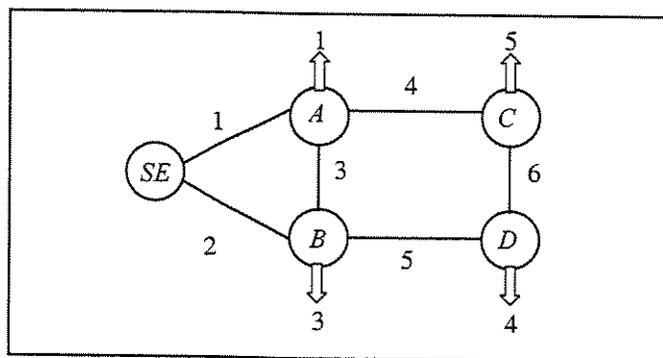


Figura 3.6: Grafo que apresenta os caminhos de abastecimento de energia elétrica, aos bairros da cidade i .

Com todas as chaves inicialmente fechadas, encontra-se uma distribuição factível de fluxos, apresentada na Tabela 3.1. Utilizando-se os conceitos da fase de construção do método GRASP, deseja-se abrir seqüencialmente as chaves, com o objetivo de remover os ciclos da rede, mas respeitando-se a restrição de atendimento dos consumidores.

Chaves	Fluxos
1	6,95
2	6,05
3	1,11
4	4,84
5	4,16
6	0,16

Tabela 3.1: Fluxos em cada chave da rede (ou em cada arco do grafo).

Ordena-se todas as chaves que formam ciclos na rede, de maneira crescente em relação aos fluxos que percorrem as chaves (critério guloso). As chaves ordenadas são armazenadas em uma lista de candidatas a serem abertas, denominada de RCL. Considera-se a lista restrita a um número máximo de 4 chaves (com os menores fluxos). Logo, a lista ficará:

$$RCL = \{6, 3, 5, 4\}.$$

Faz-se a escolha aleatória de um elemento da lista. Sorteando-se entre os números (1, 2, 3, 4), obtém-se o número 3. Portanto, o elemento escolhido aleatoriamente é o terceiro da lista RCL (trata-se da chave 5). A Figura 3.7 ilustra a rede de distribuição com a chave 5 aberta.

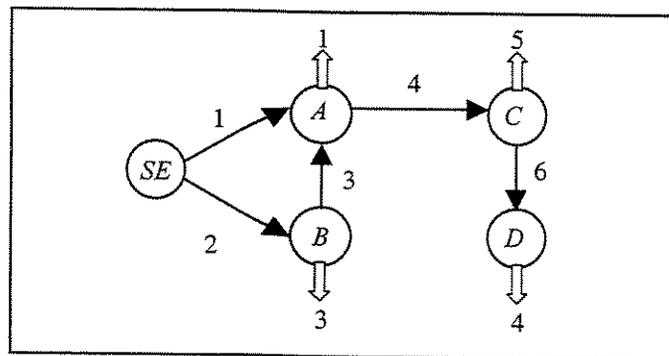


Figura 3.7: Rede de distribuição com a chave 5 aberta.

Após a abertura da chave 5, obtém-se novamente uma distribuição factível de fluxos para a rede. A Tabela 3.2 apresenta os novos valores dos fluxos.

Chaves	Fluxos
1	6,95
2	6,05
3	3,05
4	9,00
5	0,00
6	4,00

Tabela 3.2: Fluxos na rede, com a chave 5 aberta.

Utilizando mais uma vez o critério guloso, as chaves que formam ciclos na rede são ordenadas de forma crescente conforme o valor do fluxo, obtendo a nova lista RCL (como apenas 3 arcos formam ciclo, a lista RCL fica reduzida para 3 elementos).

$$RCL = \{3, 2, 1\}$$

Uma nova escolha aleatória é realizada - desta vez apenas entre os números 1, 2 e 3. Obtém-se, por exemplo, o número 2, que corresponde ao segundo elemento de RCL (ou seja, foi sorteada a chave número 2).

Abrindo a chave 2, a rede passa a apresentar uma configuração sem ciclos, onde todos os consumidores estão sendo atendidos. A Figura 3.8 ilustra a rede de distribuição encontrada, com uma estrutura radial. A Tabela 3.3 apresenta os valores dos fluxos em cada chave da rede radial.

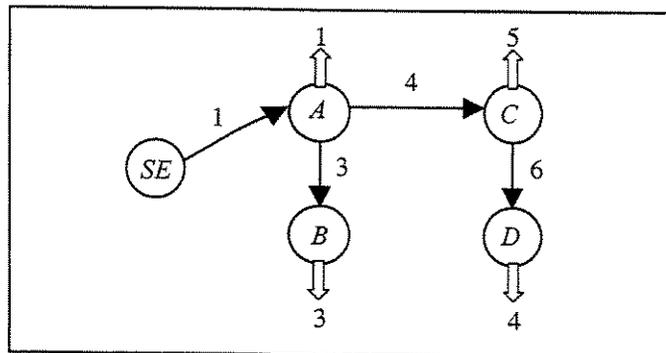


Figura 3.8: Rede de distribuição encontrada, com estrutura radial.

Chaves	Fluxos
1	13,00
2	0,00
3	3,00
4	9,00
5	0,00
6	4,00

Tabela 3.3: Fluxos na rede com estrutura radial.

Tendo alcançado o objetivo de obter uma rede radial, encerra-se a fase de construção do GRASP. É o momento de se começar a fase de busca local, procurando-se na vizinhança uma solução melhor que a solução construída.

Estabelece-se aqui, como ilustração, que uma solução radial é melhor do que a solução obtida na fase de construção se obtiver uma distribuição mais uniforme dos fluxos, não ultrapassando o valor máximo de 11 unidades de energia elétrica em cada chave.

Observando a tabela 3.3, nota-se que a chave 1 ultrapassa o valor de 11 unidades. Pode-se, então, reconfigurar a rede para melhorar a distribuição de fluxos. Chama-se de vizinhança, todos os arcos que estão ligados em um mesmo nó, ou em outras palavras, todas as chaves que estão conectadas a um bairro (bloco de carga), independentemente de seus estados (abertas ou fechadas).

Tomando-se o bloco de carga *B*, segundo o critério de vizinhança definido acima, as chaves 2, 3 e 5 são chaves vizinhas. Ao fechar-se a chave 2, uma chave deverá ser aberta para manter a estrutura radial. A chave 5 está aberta, portanto a única chave vizinha que pode ser aberta é a chave 3.

Efetua-se esta troca de estados das chaves, abrindo-se a chave 3 e fechando-se a chave 2. A configuração está representada na Figura 3.9. A tabela 3.4 apresenta os novos valores dos fluxos.

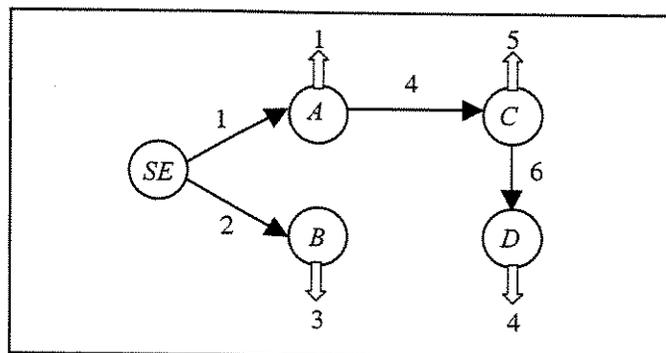


Figura 3.9: Rede de distribuição obtida através de busca local.

<i>Chaves</i>	<i>Fluxos</i>
1	11,00
2	3,00
3	0,00
4	9,00
5	0,00
6	4,00

Tabela 3.4: Fluxos na rede obtidos após a trocas de chaves.

Encerra-se, com essa solução a fase de busca local. Ao final desta fase, encerra-se também a busca de melhores soluções através do método GRASP. Como este exemplo tem apenas intuito ilustrativo, não houve preocupação em encontrar-se diversas soluções, para cada fase do método.

Conhecendo-se o método e ilustrado seu funcionamento, apresenta-se no capítulo seguinte (*Capítulo 04*) sua aplicação à redução de perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica.

Capítulo 04

Redução de Perdas pelo Método GRASP

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta a estratégia de solução para o problema de Redução de Perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica pelo Método GRASP. O primeiro item faz uma breve descrição da abordagem por buscas informadas, desenvolvido por Cavellucci e Lyra (1997). Em seguida, apresenta-se a especialização do método GRASP para o problema (aliado a buscas informadas). Apresenta-se o Método do Gradiente Reduzido para fluxos em redes e, no último item do capítulo, detalha-se a busca local implementada.

4.2 Buscas Informadas

Usando os conceitos adotados por Cavellucci e Lyra (1997), configurações radiais que minimizem as perdas em redes de distribuição podem ser encontradas através de busca em *espaço de estados*, onde cada estado (também chamado de nó do grafo de busca) é caracterizado por uma configuração de rede com distribuição ótima de fluxos.

A busca é iniciada no estado inicial (nó inicial), identificado com a solução de um problema relaxado P_r , ou seja, uma configuração de rede com ciclos tendo todas as chaves fechadas. Estados sucessores são gerados pela abertura de chaves e solução dos problemas P_r para as configurações de redes resultantes - as perdas na rede aumentam sempre que uma chave é aberta para eliminação de um ciclo.

A geração de nós sucessores vai construindo uma árvore de busca, como representado na Fig. 4.1.

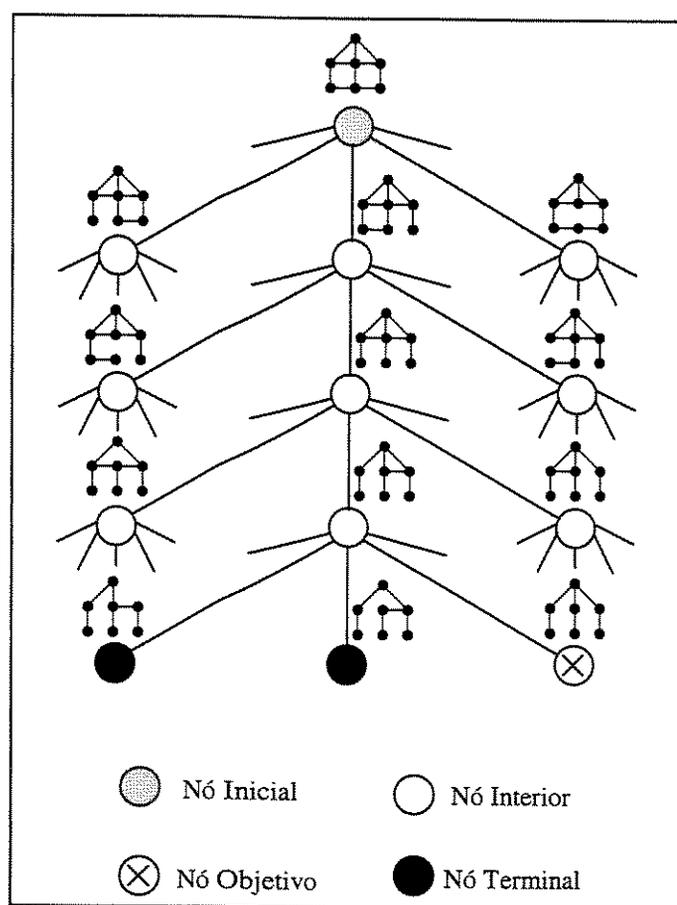


Figura 4.1: Árvore de Busca para Obtenção de uma Solução com Menores Valores de Perdas.

4.3 GRASP para Redução de Perdas em Redes de Distribuição

O método GRASP para a abordagem do problema de redução de perdas elétricas em sistemas de distribuição de energia elétrica (\mathcal{P}) pode ser resumido na seqüência de passos a seguir.

Passo 00 Inicializar a variável S com o valor das perdas em uma configuração conhecida de operação para a rede de distribuição e faça $k \leftarrow 0$.

Passo 01 Relaxar a restrição de operação radial da rede de distribuição e resolver o problema relaxado (\mathcal{P}_r), encontrando os fluxos ótimos para a configuração inicial da rede.

Passo 02 Ordenar os arcos da rede que formam ciclo em ordem crescente, do arco com menor fluxo para o arco com maior fluxo (critério guloso). Armazenar estes arcos em uma lista (RCL).

Passo 03 Se a lista RCL não estiver vazia, selecionar aleatoriamente um arco, entre os α primeiros arcos da lista (ou entre todos os arcos da lista RCL, se esta contiver menos de α arcos).

Caso contrário, se a lista RCL estiver vazia, ir para o **Passo 07**.

Passo 04 Abrir o arco selecionado e resolver este novo problema relaxado (\mathcal{P}_r), encontrando os fluxos ótimos e a função de perdas mínimas $f(n)$, para a rede associada a \mathcal{P}_r .

Passo 05 Comparar $f(n)$ com S . Se $f(n) \geq S$, voltar ao **Passo 03**.

Caso contrário, continuar.

Passo 06 Se há ciclo na rede associada ao nó n da árvore de busca, voltar ao **Passo 02**.

Caso contrário, fazer $S \leftarrow f(n)$ e continuar. A fase de construção GRASP foi concluída.

Passo 07 Fazer a *busca local*, encontrando a melhor solução (S') na vizinhança da solução construída.

Passo 08 Se a solução encontrada pela busca local for melhor que a solução atual, atualiza-se a solução corrente (se $S' < S$, fazer $S \leftarrow S'$). Continuar.

Caso contrário, manter o valor da solução atual e continuar. A fase de busca local GRASP foi concluída.

Passo 09 Fazer $k \leftarrow k + 1$,

se o número máximo de iterações não foi ultrapassado, voltar ao **Passo 01**.

caso contrário, PARAR e mostrar a melhor solução encontrada.

Nos Passos 01 e 04 do Algoritmo para minimização de perdas, utiliza-se o Método do Gradiente Reduzido para Fluxos em Redes. Entre os passos 02 e 06 desenvolve-se a Fase de Construção GRASP e entre os passos 07 e 08 desenvolve-se a Fase de Busca Local GRASP. Assim, foi elaborada a estratégia de solução para se resolver o problema de perdas elétricas em sistemas de distribuição de energia, através de um método heurístico, partindo de um método determinístico.

4.4 Gradiente Reduzido para Fluxos em Redes

Teoricamente, os fluxos ótimos de potência na rede poderiam ser calculados por qualquer método para otimização de funções não lineares com restrições. No entanto, como o problema é resolvido muitas vezes no processo de solução, adota-se a especialização do método do Gradiente Reduzido para Fluxos em Redes com função objetivo não linear, desenvolvido por Cavellucci e Lyra (1997).

Outra alternativa, seria encontrar os fluxos ótimos através de algoritmo para o cálculo de fluxos de carga, usando as propriedades demonstradas por Merlin e Back (1975). Porém, há indícios de que esta alternativa seja menos robusta, exigindo cuidados especiais para a implementação, como observado por Shirmohammadi e Hong (1989), em discussão que acompanha o trabalho de Wagner e co-autores (1991).

O método do Gradiente Reduzido (Luenberger, 1984) é um método primal para a resolução de problemas de otimização com função objetivo não linear e restrições lineares. É inspirado nos conceitos do método Simplex para otimização linear.

Considere o problema de otimização de fluxos numa rede (\mathcal{P}_r), formulado através das Equações (4.1).

$$\mathcal{P}_r \begin{cases} \text{Min } f(x) \\ \text{s.a: } Ax = b; \\ \underline{x} \leq x \leq \bar{x} \end{cases} \quad (4.1).$$

Onde:

$f(x)$: função contínua e diferenciável até segunda ordem, ou seja, $f \in C^2$;

A : matriz de dimensão $m \times n$, ou seja, $A \in \mathfrak{R}^{m \times n}$;

x : vetor coluna de dimensão n , ou seja, $x \in \mathfrak{R}^n$;

b : vetor coluna de dimensão m , ou seja, $b \in \mathfrak{R}^m$.

Supondo que x é um vetor, pode-se particioná-lo em dois grupos, sendo a letra T o índice do conjunto das variáveis dependentes e a letra I o índice do conjunto das variáveis independentes.

Para a partição das variáveis dependentes, a matriz A^T deve ser uma matriz quadrada e não singular (matriz inversível); as variáveis x_t , $t \in T$ devem estar estritamente dentro do intervalo de factibilidade ($\underline{x}_t \leq x_t \leq \bar{x}_t$). Quando não for possível obter esta separação por inspeção, adota-se um procedimento semelhante ao da Fase 1 do método Simplex (Bazaraa, 1990).

O Método do Gradiente Reduzido para redes pode ser caracterizado pela seqüência de passos a seguir.

1º Passo Calcula-se o gradiente da função $f(x)$ no ponto x^0 ,
 $\nabla f(x^0)$.

2º Passo Calcula-se o vetor de potenciais,
 $\lambda(x) = \nabla_T f(x) (A^T)^{-1}$.

3º Passo Calcula-se o gradiente reduzido,
 $\rho = \nabla_I f(x) + \lambda(x) A^I$.

4º Passo Para todo $i \in I$, faz-se:

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

Ou :

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

5º Passo Se $\Delta x_i = 0$ para todo $i \in I$, a solução é ótima – satisfaz as condições de otimalidade de Kuhn-Tucker, para problemas de otimização com restrições (Luenberger, 1984). Para-se o processo iterativo.

Caso contrário, se $\exists i$ tal que $\Delta x_i \neq 0$, continua-se.

6º Passo Calcula-se a variação unitária das variáveis dependentes.

$$\Delta x_T = [(A^T)^{-1} A^I] \Delta x_I.$$

7º Passo Calcula-se o passo α ,

$$\alpha_1 = \max \{ \alpha : \underline{x}_T \leq (x_T^0 - \alpha \Delta x_T) \leq \bar{x}_T \}$$

$$\alpha_2 = \max \{ \alpha : \underline{x}_I \leq (x_I^0 - \alpha \Delta x_I) \leq \bar{x}_I \}$$

$$\alpha_L = \min \{ \alpha_1, \alpha_2 \}$$

$$\alpha_3 = \arg \{ \underset{0 \leq \alpha \leq \alpha_L}{\text{Min}} f(x + \alpha \Delta x) \}.$$

8º Passo Se $\alpha_3 < \alpha_1$ então, volta-se ao 1º Passo.

Caso contrário, se uma variável básica atingir um de seus limites, será necessário trocar a base. Continua-se.

9º Passo Define-se uma nova partição de variáveis dependentes T e independentes I , respeitando-se as características que a partição deve satisfazer. Volta-se ao 1º Passo.

A eficiência do método do Gradiente Reduzido para solução de problemas de fluxos em redes de distribuição apoia-se também nas seguintes características:

- Em geral, encontra-se facilmente um vetor inicial de fluxos e uma partição em variáveis dependentes e independentes;
- Devido à estrutura de rede do problema, os passos do algoritmo são realizados sem manipulações com matrizes;
- os erros numéricos de arredondamentos são fortemente reduzidos em consequência da ausência de divisões para implantação dos passos 2 e 6 do algoritmo.

4.5 Busca Local

Realiza-se uma busca local, segunda fase do GRASP, com o intuito de encontrar uma melhor solução na vizinhança da solução encontrada pela fase de construção do método.

A busca local é realizada através de troca de arcos ou *troca de ramos* (Civanlar *et al*, 1988), sendo o algoritmo implementado o proposto por Baran e Wu (1989).

Em linhas gerais, a busca local, realizada por troca de ramos, pode ser resumida na seqüência de passos a seguir.

- Passo i** A partir de uma configuração de operação radial da rede de distribuição de energia elétrica, encontrada na fase de construção GRASP, calcula-se os valores das tensões para os nós correspondentes às extremidades de chaves abertas.
- Passo ii** Para cada chave aberta b , que apresentar uma diferença de tensão significativa em 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 cuja abertura proporcionará a maior redução de perdas (ΔP_{bm}).
 - Se não existir chaves com quedas de tensões significativas entre seus terminais, PARAR - o processo de troca de chaves está concluído.
- Passo iii** Realizar as operações de chaveamento (fechamento de b e abertura de m) que proporcione a maior redução de perdas (ΔP_{bm}) na rede.
- Passo iv** Atualizar os valores das tensões e voltar ao **Passo i**.

A Equação 4.2 apresenta o cálculo das tensões nos nós (i), extremos das chaves abertas (Baran e Wu, 1989).

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) \quad (4.2).$$

Onde V é a tensão nos nós, P e Q são os fluxos de potência ativa e reativa nas chaves, r é a resistência das linhas e x a impedância das linhas.

A Figura 4.2 (Baran and Wu, 1989) representa os fluxos de potência (ativa e reativa) em um alimentador de rede radial de distribuição de energia elétrica. As cargas ativas e reativas nos barramentos (P_{Li} , Q_{Li}) são consideradas constantes.

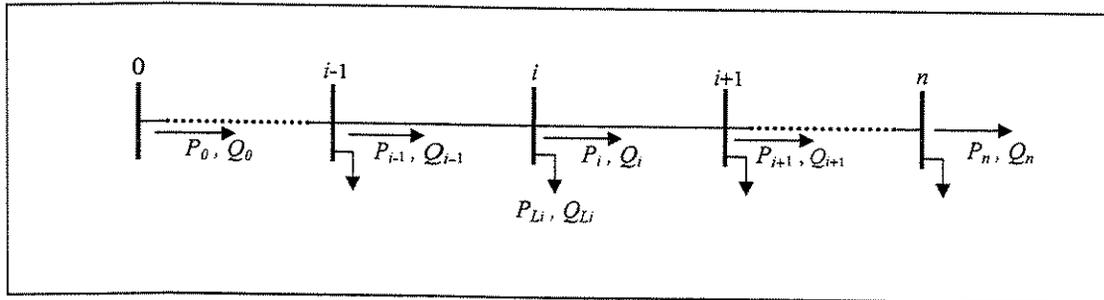


Figura 4.2: Otenção das Potências em uma Rede Radial.

Os fluxos de potência ativa e reativa, podem ser calculados através das equações recursivas 4.3.

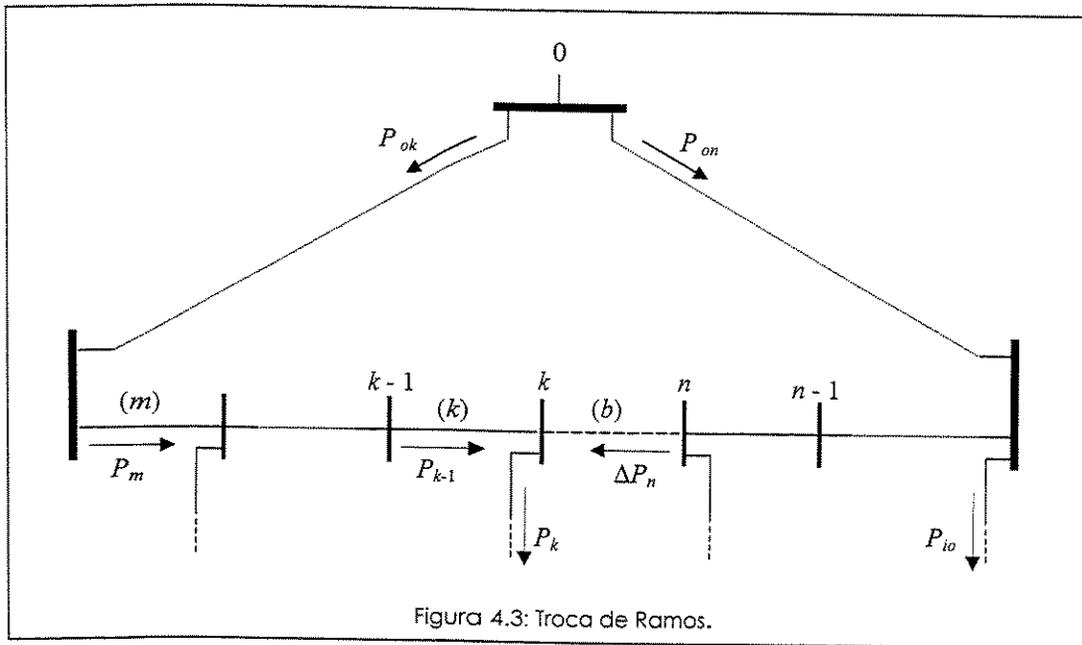
$$P_{i+1} = P_i - P_{Li+1} \text{ e } Q_{i+1} = Q_i - Q_{Li+1} \quad (4.3).$$

Já a Equação 4.4 apresenta a estimativa de redução de perdas (ΔP_{bm}) com a operação de fechamento da chave b e a abertura da chave m (Baran e Wu, 1989).

$$\Delta P_{bm} = 2P_m \left(\sum_{i \in L} r_i P_i - \sum_{i \in R} r_i P_i \right) + 2Q_m \left(\sum_{i \in L} r_i Q_i - \sum_{i \in R} r_i Q_i \right) - (P_m^2 + Q_m^2) \left(\sum_{i \in R \cup L} r_i \right) \quad (4.4).$$

Onde o conjunto L contém as chaves do ciclo entre os nós (0, ..., $k-1$ e k); o conjunto R contém as chaves do lado oposto (0, ..., $n-1$, n e K).

A Figura 4.3 (Baran and Wu, 1989) ilustra o procedimento de redução de perdas por troca de ramos em um determinado anel (busca local).



O próximo capítulo (Capítulo 05) traz aplicações dos algoritmos aqui apresentados a diversas redes de distribuição de energia elétrica.

Capítulo 05

Estudo de Casos

5.1 Introdução

Este capítulo é destinado à apresentação dos casos estudados, com a aplicação da metodologia apresentada para o problema de redução de perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica. Inicialmente, apresenta-se o algoritmo com um exemplo ilustrativo. Em seguida, apresenta-se os resultados obtidos para redes com soluções ótimas conhecidas. Estuda-se também a aplicação da metodologia a uma rede com solução ótima desconhecida (parte da rede de distribuição da cidade de Bauru, no estado de São Paulo).

5.2 Ilustração do Algoritmo para Redução de Perdas

Neste item apresenta-se um exemplo ilustrativo sobre a aplicação do método GRASP para a redução de perdas em redes de energia elétrica.

Dados Iniciais

Como dado inicial para o algoritmo de redução de perdas, é necessário apresentar a rede de distribuição modelada em forma de grafo (*Capítulo 02*). O modelo precisa especificar as chaves (arcos) do sistema, o número de blocos de

cargas (nós), a quantidade de energia consumida em cada bloco (nó) e a capacidade das subestações (conforme Apêndice 2).

A Figura 5.1 mostra uma representação gráfica da rede utilizada neste exemplo, a unidade de carga está em Ampère. Os fluxos iniciais para a rede em operação estão apresentados na Tabela 5.1. O algoritmo GRASP (Capítulo 04) aplicado a esta rede realiza a seqüência de passos descritos a seguir.

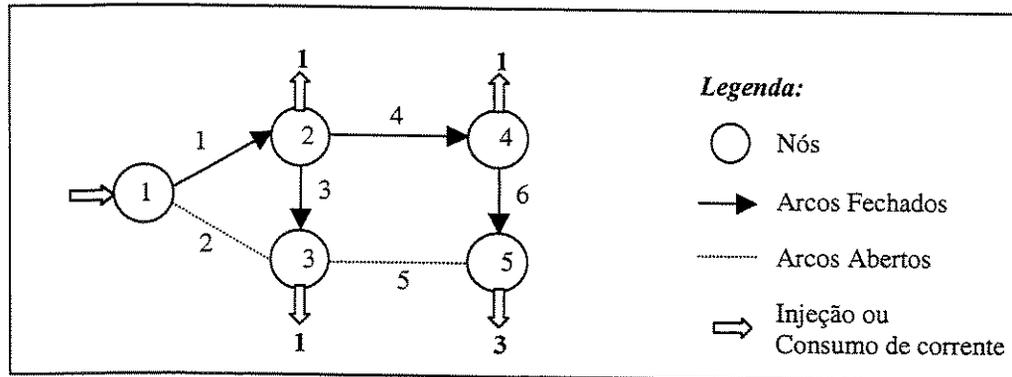


Figura 5.1: Rede Inicial

Chaves	Fluxos (KW)
1	143,414
2	0,000
3	23,902
4	95,609
5	0,000
6	71,707

Tabela 5.1: Fluxos na Rede Inicial.

Passo 00

Inicializando a variável S com o valor das perdas nesta configuração de operação para a rede de distribuição, tem-se:

$$\text{Perdas iniciais} = 0.000186 \text{ KW}$$

$$s = 0.000186$$

$$k = 0$$

Passo 01

Relaxando a restrição de operação radial da rede de distribuição obtém-se a rede da Figura 5.2.

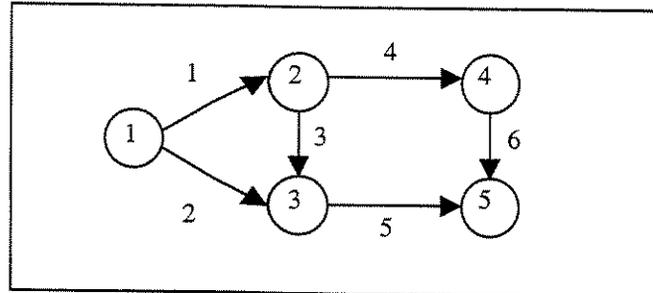


Figura 5.2: Rede Relaxada.

Resolvendo este problema relaxado (\mathcal{P}_r), encontra-se os fluxos ótimos para a configuração inicial da rede, mostrados na Tabela 5.2.

Chaves	Fluxos (KW)
1	70,3076
2	73,1062
3	4,5506
4	41,8546
5	53,7546
6	17,9523

Tabela 5.2: Fluxos ótimos na rede relaxada.

Passo 02

Os arcos da rede que formam ciclo são ordenados de forma crescente, de acordo com os valores dos fluxos e armazenados em uma lista denominada RCL.

$$RCL = \{3, 6, 4, 5, 1, 2\}$$

Passo 03

Faz-se um sorteio entre todos os elementos da lista RCL, obtendo-se, por exemplo, o primeiro elemento da lista (arco 3).

Passo 04

Abre-se o arco selecionado (arco 3) e resolve-se um novo problema relaxado (\mathcal{P}_r), para a rede representada na Figura 5.3.

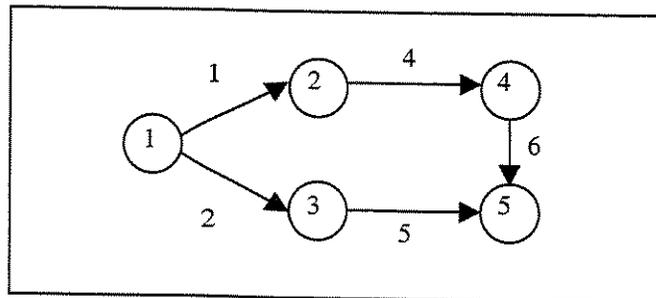


Figura 5.3: Nova rede Relaxada.

Assim, encontra-se os fluxos ótimos e a função de mínimas perdas $f(n)$ para a rede associada a \mathcal{P}_r . A Tabela 5.3 apresenta os valores dos fluxos ótimos obtidos. Para esta solução, a função de mínimas perdas será: $f(n) = 0.000080$.

Chaves	Fluxos (KW)
1	66,9265
2	76,4874
3	0,0000
4	43,0241
5	52,5851
6	19,1218

Tabela 5.3: Fluxos ótimos na rede relaxada.

Passo 05

Compara-se a função de mínimas perdas com a variável de atualização das perdas, que contém o valor inicial, ou seja, compara-se $f(n)$ com S .

$$S = 0.000186$$

$$f(n) = 0.000080$$

Como a variável S tem valor maior que a função de mínimas perdas ($f(n) < S$), realiza-se o **Passo 6**.

Passo 06

Ainda há ciclos na rede associada (Figura 5.3) ao nó n da árvore de busca, volta-se ao **Passo 02**.

Passo 02

Os arcos da rede que formam ciclos são ordenados de forma crescente, de acordo com os valores dos fluxos e armazenados em uma lista denominada RCL.

$$RCL = \{ 6, 4, 5, 1, 2 \}$$

Passo 03

Faz-se um sorteio entre os todos os elementos da lista RCL, obtendo-se, por exemplo, o terceiro elemento da lista (arco 5).

Passo 04

Abre-se o arco selecionado (arco 5) e resolve-se um novo problema relaxado (\mathcal{P}_r), para a rede representada na Figura 5.4.

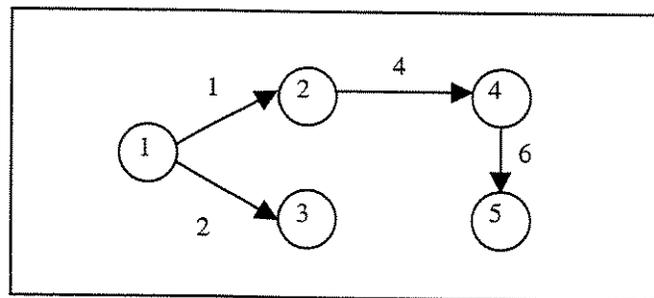


Figura 5.4: Nova rede Relaxada.

Encontra-se os fluxos ótimos e a função de mínimas perdas $f(n)$ para a rede associada a \mathcal{P}_r . A Tabela 5.4 apresenta os valores dos fluxos ótimos obtidos. Para esta solução, a função de mínimas perdas será: $f(n) = 0.000153$.

Chaves	Fluxos (KW)
1	119,5115
2	23,9023
3	0,0000
4	95,6092
5	0,0000
6	71,7069

Tabela 5.4: Fluxos ótimos na rede relaxada.

Passo 05

Compara-se a função de mínimas perdas com a variável de atualização das perdas, ou seja, compara-se $f(n)$ com S .

$$s = 0.000186$$

$$f(n) = 0.000153$$

Como s tem valor maior que a função de mínimas perdas ($f(n) < s$), realiza-se o **Passo 6**.

Passo 06

Não há mais ciclos na rede associada (Figura 5.4) ao nó n da árvore de busca. Logo, n é um nó terminal (solução factível), com um menor valor para as perdas. A variável S recebe o valor da função de mínimas perdas ($s \leftarrow f(n)$), - o novo valor de s é 0.000153.

Encerra-se aqui a fase de Construção GRASP.

Passo 07

Após a execução desta fase do GRASP para redução de perdas, obtém-se a rede apresentada na Figura 5.4 –uma solução factível (rede sem ciclos). Realiza-se, então, a segunda fase do GRASP (fase de Busca Local), executando-se o algoritmo de troca de ramos (Baran and Wu, 1989).

Passo i Calcula-se os valores das tensões para os nós 2, 3 e 5.

Passo ii Para cada chave aberta (chave 3 e chave 5) faz-se:

Fecha-se a chave 3 e obtém-se a rede com ciclo, formada pelos seguintes arcos: (1, 2 e 3).

Percorrendo-se a rede com ciclo, a chave que proporciona a maior redução é novamente a chave 3.

Fecha-se a chave 5 e obtém-se uma rede com ciclo, formada pelos seguintes arcos: (1, 2, 4, 5 e 6).

Percorrendo-se essa rede com ciclo, a chave que proporciona a maior redução é a chave 6.

Passo iii A chave 3 continuará aberta.

Fecha-se a chave 5 e abre-se a chave 6.

Passo iv Atualiza-se os valores das tensões e retorna-se ao **Passo ii**.

Passo ii Para cada chave aberta (chave 3 e chave 6) verifica-se:

Não existem chaves com quedas de tensões significativas entre seus terminais, PARA-SE – a busca local está concluída (obtendo a rede da Figura 5.5 como solução).

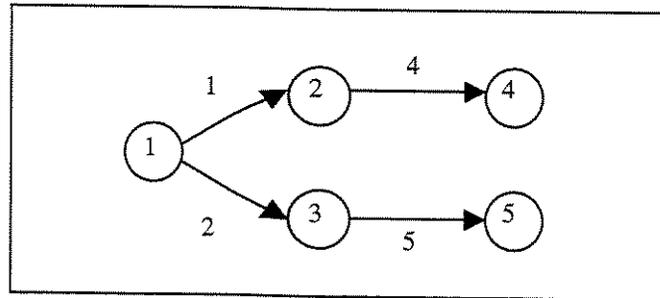


Figura 5.5: Rede obtida após Busca Local GRASP.

Encerra-se o algoritmo de busca local, encontrando-se como valor para as perdas: $s' = 0.000090$.

Passo 08

Compara-se a solução encontrada após a busca local (s') com a solução encontrada após a fase de construção (s) e verifica-se que s' é menor que s .

$$s = 0.000153$$

$$s' = 0.000090$$

Então, corrige-se a variável s para o novo valor encontrado ($s \leftarrow s'$), - o novo valor de s é 0.000090.

Encerra-se aqui a fase de Busca Local GRASP.

Passo 09

Verifica-se a satisfação do critério de parada. Como o objetivo aqui é apenas ilustrativo, supõe-se que encontrar uma única solução com redução de perdas ($K = 1$) é suficiente, PARA-SE o algoritmo. A solução encontrada é a rede apresentada na Figura 5.5.

É possível verificar-se que a configuração encontrada é a configuração de mínimas perdas. Esta solução reduziu em aproximadamente 48% o valor das perdas em relação as perdas iniciais (neste caso, propositadamente escolhido como uma solução de altos valores para as perdas).

5.3 Casos Estudados

Os programas, para redução de perdas no sistema de energia elétrica utilizando o método GRASP foram implementados em Linguagem C, em sistema operacional *Windows*, e executados em compilador *Borland* versão 4.5. O equipamento utilizado foi um computador com processador *Pentium*, com velocidade de 133 MHz e 64 Kb de memória RAM.

5.3.1 Rede 'Baran e Wu'

Adota-se para iniciar o estudo de casos a rede de distribuição utilizada por *Baran e Wu* (1989), com 33 nós, 38 arcos e carregamento de 3715 KW. Esta rede, apresentada na Figura 5.6, aparece com freqüência na literatura sobre o tema de minimização de perdas na distribuição de energia elétrica. Tem-se também a vantagem de que a solução ótima do problema de minimização de perdas para a rede é conhecida - foi obtida por *Cavellucci e Lyra* (1997).

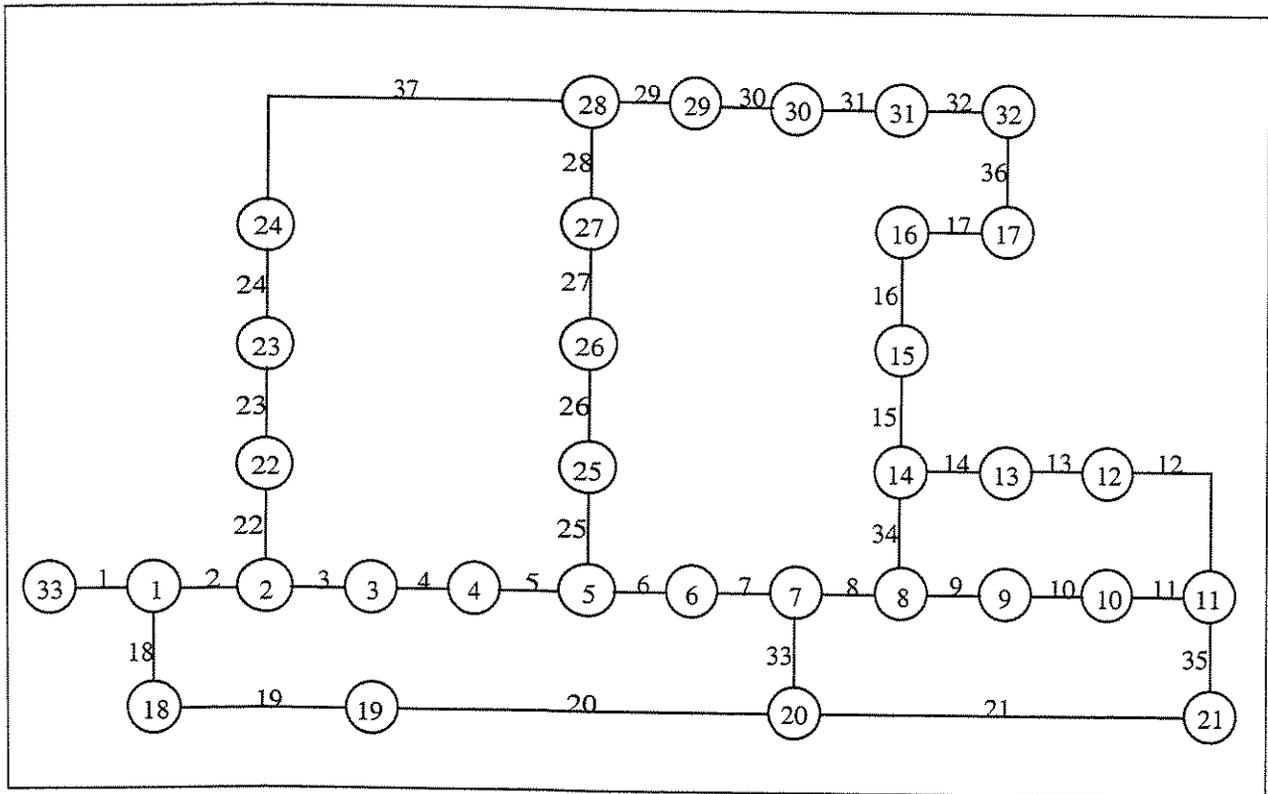


Figura 5.6: Rede (BWU).

A Tabela 5.5 apresenta os melhores resultados obtidos com as fases de construção e buscas locais do método GRASP para a redução de perdas.

Valores das Perdas (KW)			
Perdas Iniciais	Solução Ótima	GRASP	
		Fase de Construção	Fase de Busca Local
110,7032	84,0750	93,3446	84,0750
Total de Redução em %		15,68 %	24,05 %

Tabela 5.5: Resultados Obtidos.

Os arcos (chaves) abertos na solução inicial são: 20, 34, 35, 36 e 37. Ao final da fase de construção, com redução de cerca de 16% nas perdas elétricas, os arcos abertos são: 06, 08, 11, 17 e 24.

A melhor solução obtida com a implementação de buscas locais, leva a uma redução adicional de cerca de 8% nas perdas. Os arcos abertos na melhor solução são: 07, 09,14, 32 e 37. Observa-se que a solução obtida para essa rede, ao final do processo (com implementação de buscas locais), é a solução ótima.

5.3.2 Rede 47

Com o objetivo de continuar avaliando o desempenho do algoritmo desenvolvido neste trabalho, mostra-se uma nova rede de pequeno porte, onde mais uma vez é conhecida a solução ótima. Trata-se de uma rede construída por Cavellucci (1999), com a finalidade de testar algoritmos. A rede, denominada "rede 47" e apresentada na Figura 5.7, é formada por 47 nós, 51 arcos e tem carregamento de 22 KW.

A Tabela 5.6 apresenta os melhores resultados obtidos com as fases de construção e buscas locais do método GRASP para a redução de perdas.

Valores das Perdas (KW)			
Perdas Iniciais	Solução Ótima	GRASP	
		Fase de Construção	Fase de Busca Local
2,525	2,117	2,245	2,117
Total de Redução em %		11,09 %	16,16 %

Tabela 5.6: Resultados Obtidos.

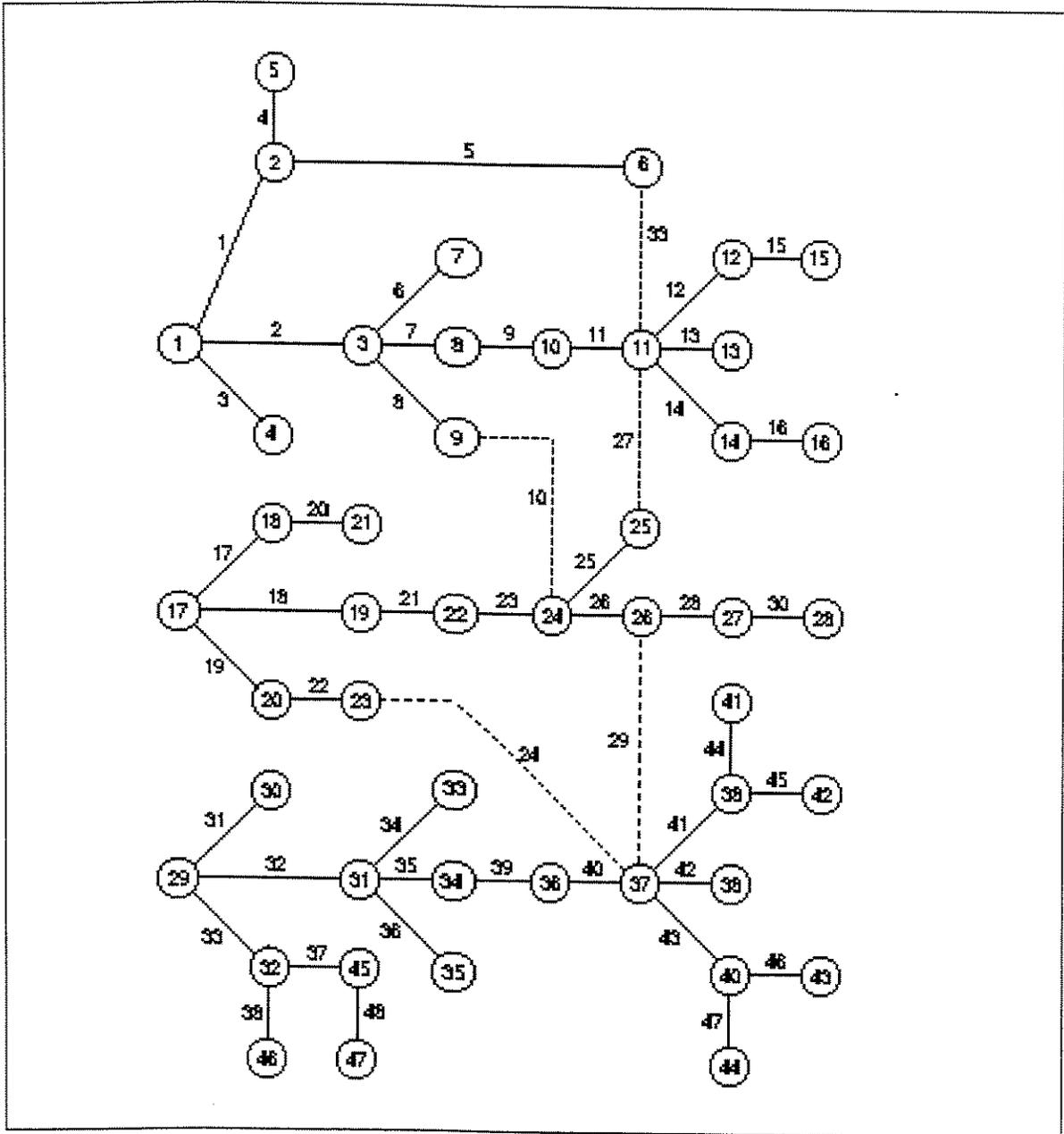


Figura 5.7: Rede 47.

Os arcos (chaves) abertos na solução inicial são: 10, 24, 27 e 29. Ao final da fase de construção, com redução de cerca de 11% nas perdas elétricas, os arcos abertos são: 10, 27, 29 e 39.

A melhor solução obtida com a implementação de buscas locais, leva redução adicional de cerca de 6% nas perdas. Os arcos abertos na melhor solução são: 10, 27, 29 e 40. Observa-se que a solução obtida para a rede 47, ao final do processo (com implementação de buscas locais), também é a solução ótima.

5.3.2 Rede 'pBauru'

Após a ilustração do algoritmo e a sua comparação com algoritmos exatos, testa-se o algoritmo de redução de perdas utilizando GRASP para uma rede maior. Esta rede representa parte da cidade de Bauru – SP (seus dados estão apresentados no Apêndice 3).

A rede, denominada pBauru, tem 66 nós, 83 arcos e um carregamento total de 16.765 KW. Em cada teste realizado a lista restrita de candidatos (RCL) contém diferentes números de elementos.

As tabelas a seguir contêm soluções encontradas em cada fase GRASP (1ª Fase, Construção, e 2ª Fase, Busca Local). As tabelas apresentam também o valor das reduções em percentagem (em relação à solução inicial, na fase de construção e em relação à solução construída, na fase de busca local) e os tempos de execuções de cada fase (em segundos). Os gráficos apresentam percentagem de redução das perdas, após a primeira fase e percentagem total de redução das perdas, após a execução das duas fases GRASP.

GRASP para Redução de Perdas – Teste 01					
RCL	Sol. Inicial	Fase de Construção			
Nº Elementos		Nº da Sol.	Sol. Obtida	Redução em %	Tempo em seg.
2 Arcos	379,0487	solução (01)	294,8601	22,21	150
		solução (02)	278,0487	26,65	125
		solução (03)	234,4432	38,15	62
		solução (04)	298,4735	21,26	126
		solução (05)	234,4432	38,15	98
Solução Obtida na Fase de Construção		Fase de Busca Local			
		Nº da Sol.	Sol. Obtida	Redução em %	Tempo em seg.
294,8601		solução (01)	268,4661	8,95	2,70
278,0487		solução (02)	265,1531	4,64	3,68
234,4432		solução (03)	228,3649	2,59	2,42
298,4735		solução (04)	265,1531	11,16	3,95
234,4432		solução (05)	228,3649	2,59	2,42

Tabela 5.6: Resultados Obtidos Utilizando GRASP para Redução de Perdas – Teste 01.

A Tabela 5.6 apresenta o primeiro conjunto de testes (Teste 01), na qual a lista restrita de candidatos (RCL) contém apenas dois elementos. O gráfico apresentado na Figura 5.8 contém as reduções de perdas após a primeira fase e as reduções totais obtidas pelo GRASP. A melhor solução obtida levou um tempo total de aproximadamente 1 minuto e 05 segundos, apresentando uma redução de cerca de 40%.

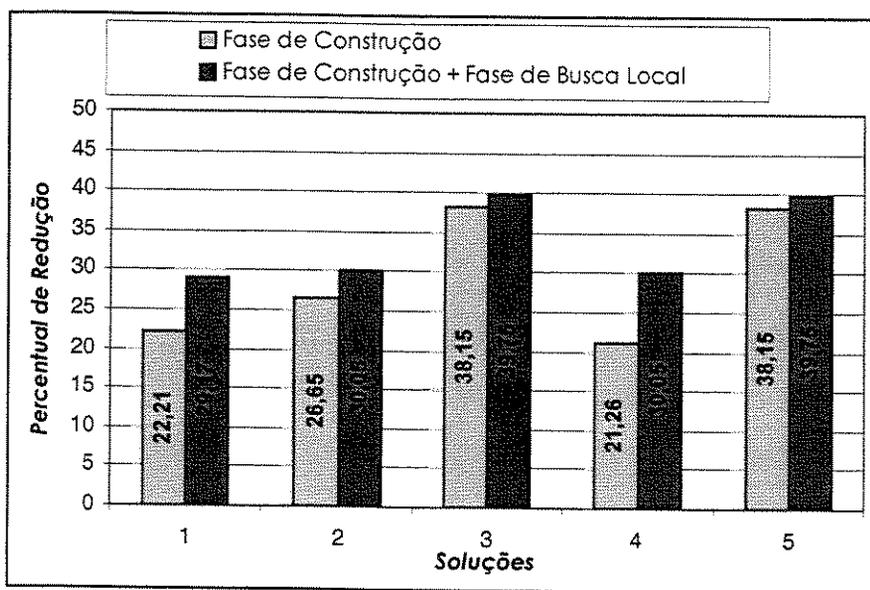


Figura 5.8: Redução em Percentagem – Teste 01.

GRASP para Redução de Perdas – Teste 02					
RCL	Sol. Inicial	Fase de Construção			
Nº Elementos		Nº da Sol.	Sol. Obtida	Redução em %	Tempo em seg.
3 Arcos	379,0487	solução (01)	310,3956	18,11	162
		solução (02)	241,4269	36,31	193
		solução (03)	241,4269	36,31	112
		solução (04)	234,4432	38,15	154
		solução (05)	238,8861	36,98	94
Solução Obtida na Fase de Construção		Fase de Busca Local			
		Nº da Sol.	Sol. Obtida	Redução em %	Tempo em seg.
310,3956		solução (01)	268,4661	13,51	3,24
241,4269		solução (02)	230,1027	4,69	3,62
241,4269		solução (03)	230,1027	4,69	3,62
234,4432		solução (04)	228,3649	2,59	2,42
238,8861		solução (05)	230,1027	3,68	3,64

Tabela 5.7: Resultados Obtidos Utilizando GRASP para Redução de Perdas – Teste 02.

A Tabela 5.7 apresenta o segundo conjunto de testes (Teste 02), na qual a lista restrita de candidatos (RCL) contém três elementos. O gráfico apresentado na Figura 5.9 contém as reduções de perdas após a fase de construção e as reduções totais obtidas pelo GRASP. A melhor solução obtida levou um tempo total de aproximadamente 2 minutos e 27 segundos, apresentando uma redução de cerca de 40%.

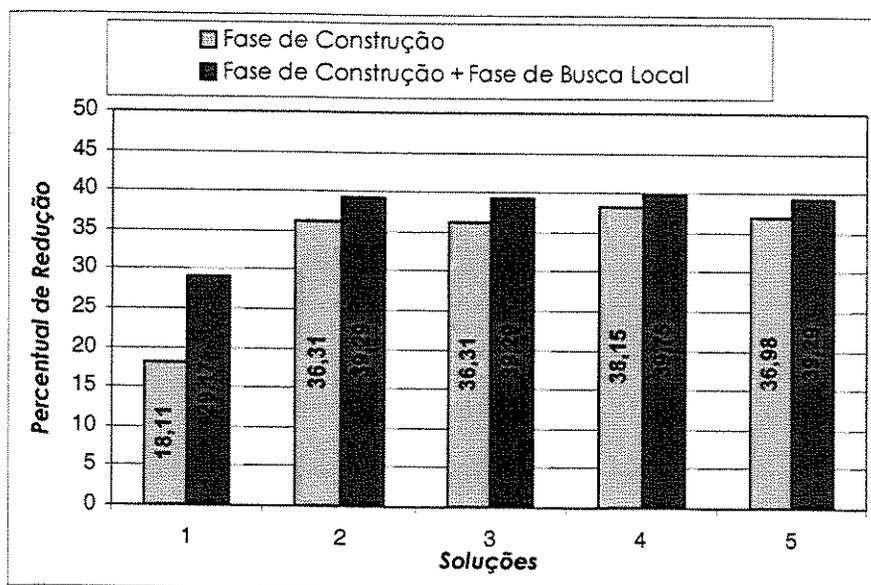


Figura 5.9: Redução em Percentagem – Teste 02.

GRASP para Redução de Perdas – Teste 03					
RCL	Sol. Inicial	Fase de Construção			
Nº Elementos		Nº da Sol.	Sol. Obtida	Redução em %	Tempo em seg.
4 Arcos	379,0487	solução (01)	271,5867	28,35	121
		solução (02)	327,5064	13,60	106
		solução (03)	357,8223	5,60	125
		solução (04)	307,1094	18,98	132
		solução (05)	293,8550	22,47	102
Solução Obtida na Fase de Construção		Fase de Busca Local			
		Nº da Sol.	Sol. Obtida	Redução em %	Tempo em seg.
271,5867		solução (01)	265,1531	2,37	3,24
327,5064		solução (02)	268,4661	18,03	3,40
357,8223		solução (03)	268,4661	24,97	3,52
307,1094		solução (04)	268,4661	12,58	4,23
293,8550		solução (05)	265,1531	9,77	3,85

Tabela 5.8: Resultados Obtidos Utilizando GRASP para Redução de Perdas – Teste 03.

A Tabela 5.8 apresenta a terceira bateria de testes (Teste 03), na qual a lista restrita de candidatos (RCL) contém quatro elementos. O gráfico apresentado na Figura 5.10 contém as reduções de perdas após a fase de construção e as reduções totais obtidas pelo GRASP. A melhor solução obtida levou um tempo total de aproximadamente 2 minutos e 05 segundos, apresentando uma redução de cerca de 30%.

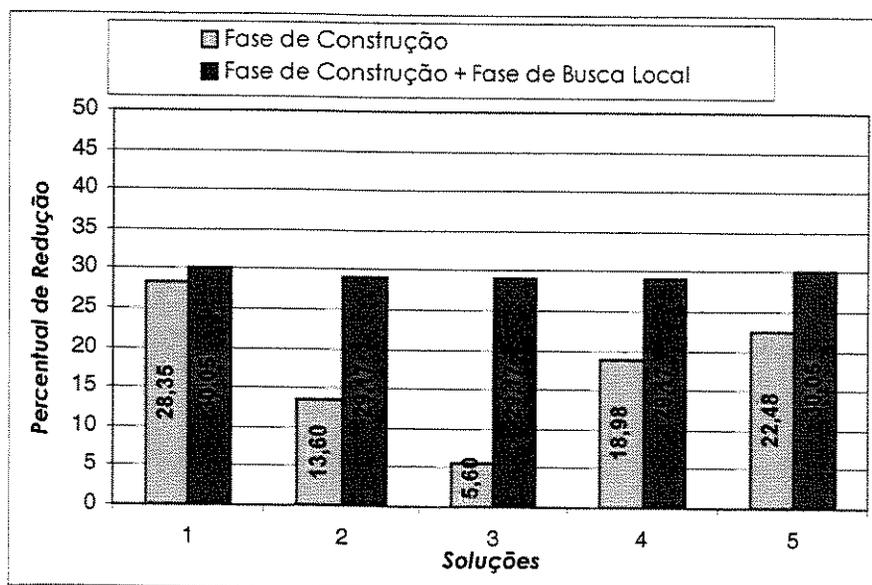


Figura 5.10: Redução em Percentagem – Teste 03.

GRASP para Redução de Perdas – Teste 04					
RCL	Sol. Inicial	Fase de Construção			
Nº Elementos		Nº da Sol.	Sol. Obtida	Redução em %	Tempo em seg.
5 Arcos	379,0487	solução (01)	321,0478	15,30	168
		solução (02)	241,4269	36,31	108
		solução (03)	343,1778	9,46	122
		solução (04)	303,8288	19,84	159
		solução (05)	238,8861	36,98	109
Solução Obtida na Fase de Construção		Fase de Busca Local			
		Nº da Sol.	Sol. Obtida	Redução em %	Tempo em seg.
321,0478		solução (01)	268,4661	16,38	3,46
241,4269		solução (02)	230,1027	4,69	3,62
343,1778		solução (03)	268,4661	21,77	4,31
303,8288		solução (04)	268,4661	11,64	4,17
238,8861		solução (05)	230,1027	3,68	3,52

Tabela 5.9: Resultados Obtidos Utilizando GRASP para Redução de Perdas – Teste 04.

A Tabela 5.9 apresenta a quarta bateria de testes (Teste 04), na qual a lista restrita de candidatos (RCL) contém cinco elementos. O gráfico apresentado na Figura 5.11 contém as reduções de perdas após a fase de construção e as reduções totais obtidas pelo GRASP. A melhor solução obtida levou um tempo total de aproximadamente 1 minuto e 53 segundos, apresentando uma redução de cerca de 40%.

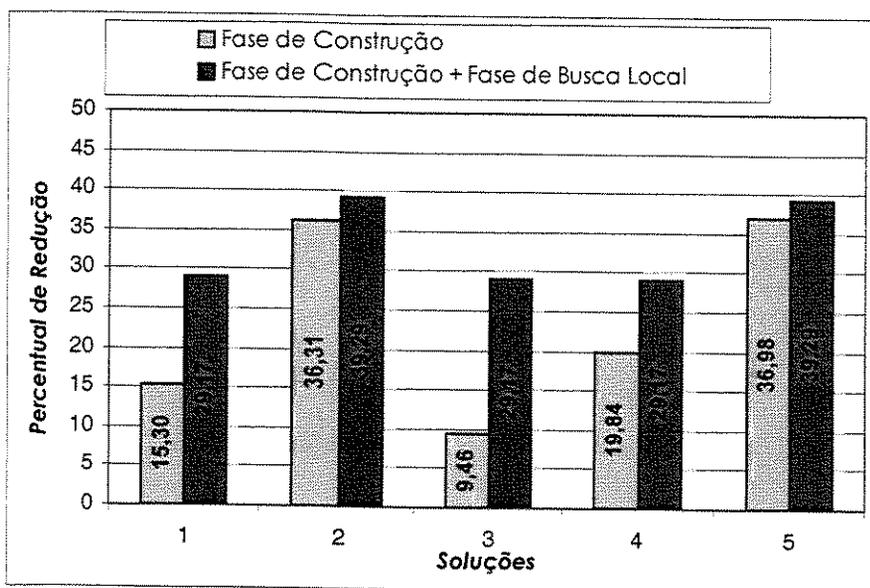


Figura 5.11: Redução em Percentagem – Teste 04.

GRASP para Redução de Perdas – Teste 05					
RCL	Sol. Inicial	Fase de Construção			
Nº Elementos		Nº da Sol.	Sol. Obtida	Redução em %	Tempo em seg.
10 Arcos	379,0487	solução (01)	349,8027	7,72	74
		solução (02)	328,0487	13,45	148
		solução (03)	241,4269	36,31	136
		solução (04)	371,3753	2,02	173
		solução (05)	349,8027	7,72	147
Solução Obtida na Fase de Construção		Fase de Busca Local			
		Nº da Sol.	Sol. Obtida	Redução em %	Tempo em seg.
349,8027		solução (01)	268,4661	23,25	4,83
328,0487		solução (02)	268,4661	18,16	3,13
241,4269		solução (03)	230,1027	4,69	3,62
371,3753		solução (04)	268,4661	27,71	5,16
349,8027		solução (05)	268,4661	23,25	4,83

Tabela 5.10: Resultados Obtidos Utilizando GRASP para Redução de Perdas – Teste 05.

A Tabela 5.10 apresenta a última bateria de testes (Teste 05), na qual a lista restrita de candidatos (RCL) contém dez elementos. O gráfico apresentado na Figura 5.12 contém as reduções de perdas após a fase de construção e as reduções totais obtidas pelo GRASP. A melhor solução obtida levou um tempo total de aproximadamente 2 minutos e 20 segundos, apresentando uma redução de cerca de 40%.

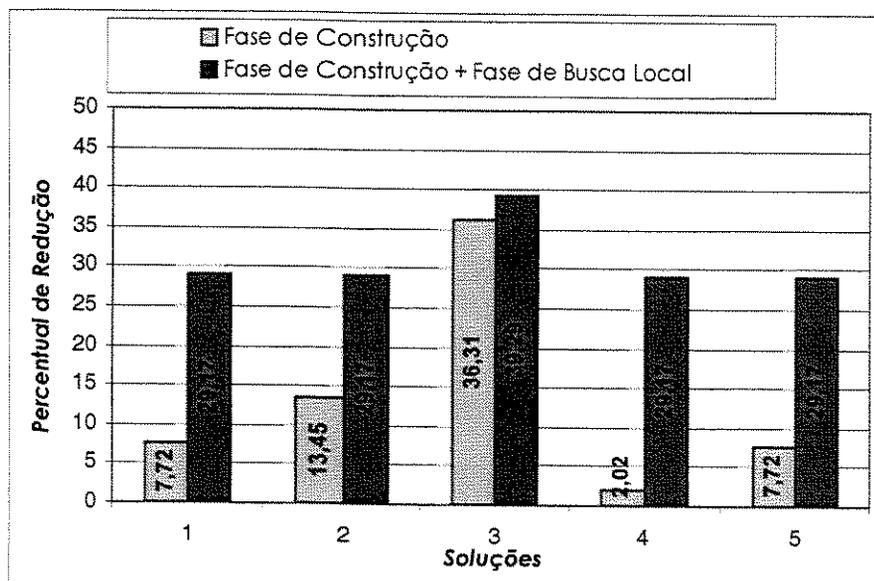


Figura 5.12: Redução em Percentagem – Teste 05.

Realizou-se ainda para a rede pBauru dois testes adicionais. No primeiro deles, não se realiza sorteio para determinar qual arco da lista restrita de candidatos (RCL) será escolhido - sempre escolhe-se o primeiro arco, ou seja, realiza-se uma busca puramente gulosa sem qualquer componente aleatória. A Tabela 5.11 apresenta os resultados obtidos neste teste na fase de construção. Para a solução construída é realizada a busca local.

GRASP para Redução de Perdas – Teste Adicional 01				
<i>Fase de Construção</i>				
Sol. Inicial	RCL	Sol. Obtida	Redução em %	Tempo em seg
379,0487	1 arco	233,0349	38,52	74
<i>Fase de Busca Local</i>				
Sol. Inicial	Sol. Obtida	Redução em %	Tempo em seg.	Tempo Total
233,0349	228,3649	39,75	3,27	1 min e 18 seg

Tabela 5.11: Resultados Obtidos no GRASP para Redução de Perdas – Puramente Guloso.

A Figura 5.13 apresenta a redução das perdas em relação à solução inicial e também o valor da redução aproximado em percentagem.

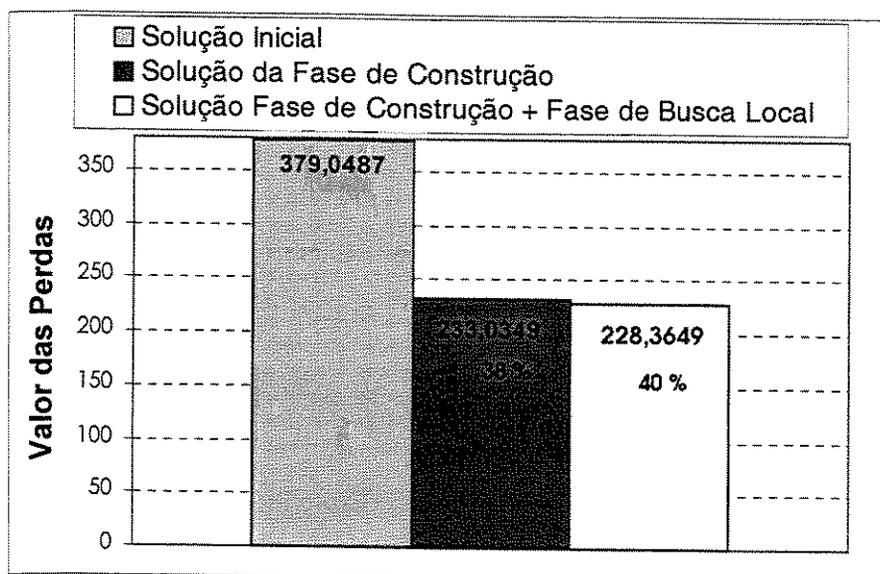


Figura 5.13: Redução das Perdas.

No segundo teste adicional realizado, executou-se diretamente a Fase de Busca Local, tendo como solução inicial a solução de partida utilizada na fase de construção. A tabela 5. 12 apresenta os resultados obtidos neste teste.

GRASP para Redução de Perdas – Teste Adicional 02			
<i>Fase Busca Local</i>			
Sol. Inicial	Sol. Obtida	Redução em %	Tempo em seg
379,0487	268,4661	29,17	6,93

Tabela 5.12: Aplicação da Busca Local à Solução Inicial.

Esta última rede teste contém também valor alto de perdas na solução inicial o que levou o método a obter reduções expressivas (da ordem de 40%).

Cabe mencionar que a execução de busca local a partir de uma solução conhecida pode ser realizada como parte do processo de inicialização da metodologia apresentada. Este procedimento torna-se atraente quando boas soluções são conhecidas, a priori.

Capítulo 06

Conclusões

O trabalho acrescenta uma contribuição para o problema de redução de perdas na distribuição de energia elétrica, incorporando conceitos do método GRASP às buscas informadas desenvolvidas por Cavellucci e Lyra (1997).

A nova abordagem reduz substancialmente o esforço de processamento, mantendo os principais atrativos da metodologia de Cavellucci e Lyra (1997):

- utilizar as informações disponíveis à priori, ou reveladas durante o processo de solução, para identificar caminhos não-promissores do espaço de buscas;
- evitar as armadilhas das soluções "ótimas" locais;
- utilizar informações de boas soluções conhecidas.

O "preço" da redução no esforço de processamento, em relação a abordagem por buscas informadas, é a perda da garantia formal de que a solução de mínimas perdas será encontrada. No entanto, ao contrário de outras abordagens bem sucedidas para o problema (como, por exemplo, *abertura seqüencial de chaves e troca de ramos*) o método GRASP permite "calibrar" o compromisso entre otimalidade e custo de processamento.

A estrutura da metodologia utilizada neste trabalho (redução de perdas com GRASP) pode ser interpretada como uma junção das abordagens mais promissoras para o problema de redução de perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica. A fase de construção pode ser vista como uma generalização do método de

abertura seqüencial de chaves. A fase de busca local corresponde ao método de troca de ramos.

A baixa quantidade de parâmetros a serem ajustados no GRASP são aspectos positivos do método. Tem-se apenas como parâmetros ajustáveis o número de componentes na lista de candidatos e o número de iterações. O critério de parada pode ser definido pelo número de soluções encontradas, eventualmente associada a uma medida de "qualidade" da melhor solução obtida.

Os testes foram realizados com diferentes números de elementos na lista restrita de candidatos (RCL). Observou-se que o valor das perdas na melhor solução encontrada não decresce necessariamente com o tamanho da lista. De fato, nos casos estudados, boas soluções são encontradas com mais freqüência quando a lista é restritiva (contém poucos elementos).

Para a rede da cidade de Bauru, sempre foi possível encontrar uma configuração que apresente reduções de perdas significativas com tempo computacional da ordem de dois minutos. Para redes de pequeno porte, com soluções ótimas conhecidas, foram encontradas as configurações de mínimas perdas.

Realizou-se ainda testes para dois casos extremos, um onde a construção de uma solução é feita apenas com a componente gulosa da busca, mas seguido da busca local. O outro teste parte diretamente para a fase de busca local, omitindo a primeira fase do método. Embora nos dois casos tenha-se conseguido redução de perdas, detectou-se que a solução completa (fase de construção + fase de busca local) consegue melhores soluções que as obtidas nestes dois casos extremos.

Sugestões

Algumas sugestões para futuros trabalhos de redução de perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica são descritas a seguir.

Seguindo-se a linha de pesquisa da metodologia aplicada neste trabalho, que utiliza o método GRASP, pode-se testar a implementação de diferentes probabilidades para a escolha dos elementos da lista restrita de candidatos (RCL), tendo os primeiros elementos, com melhores indicadores, probabilidades maiores de serem escolhidos.

Pode-se também testar a implementação do GRASP com processamento paralelo. A estrutura do método permite implementações simples, onde cada processador executa tarefas independentes, sem haver necessidade de muita comunicação entre eles - a comunicação entre os processadores pode ocorrer apenas quando uma solução for encontrada.

Referências Bibliográficas

Ahuja, R. K., Magnanti, T. L. & Orlin, J. B. (1993). *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Augugliaro, A. L. Dusonchet and S. Mangione (1995). An Efficient Greedy Approach for Minimum Loss Reconfiguration of Distribution Networks. *Electric Power Systems Research*. Vol. 35, pp. 167 –176.

Baran, M. E. & Wu, F. F. (1989). *Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 2, pp. 1401-1407.

Bazaraa, M. S., Jarvis, J. J. & Sherali, H. D. (1990). *Linear Programming and Network Flows*. John Wiley & Sons.

Borozan, V., D. Rajicic e R. R. Ackovski (1997). *Minimum Loss Reconfiguration of Unbalanced Distribution Networks*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.12, No.1, pp. 435-442.

Bueno, F. Silveira (1985). *Dicionário Escolar Silveira Bueno*. Ed. Edições de Ouro – São Paulo.

Bunch, J. B., Miller, R. D. & Wheeler, J. E. (1982). *Distribution System Integrated Voltage and Reactive Power Control*. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. 101, No.2, pp. 284-289.

Castro Jr., C.A. & Watanabe, A.(1990). *An Efficient Reconfiguration Algorithm for Loss Reduction of Distribution System*. *Electric Power System Research*, Vol. 19, pp. 137-144.

- Cavellucci, C. & Lyra Filho, C. (1997). *Minimization of Energy Losses in Electric Power Distribution Systems by Intelligent Search Strategies*. Int. Trans. Opl. Res. Vol. 4, No. 1, pp. 23-33.
- Chen, C. S. & Cho, M. Y. (1993). *Energy Loss Reduction by Critical Switches*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, pp. 1246-1253.
- Civanlar, S., Grainger, H. & Yin, S. S. H. L. (1988). *Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, pp. 1217-1223.
- CODI (1997). *Método para Determinação, Análise e Otimização de Perdas Técnicas em Sistemas de Distribuição*. Rio de Janeiro: ABRADDEE (Relatório CODI 19.34.0).
- Costa, M. F. N. (1999). *Computação Evolutiva para Minimização de Perdas Resistivas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica, UNICAMP.
- Díaz, A., Glover, F., Ghaziri H. M., Velarde, J. L. G., Laguna, M., Moscato, P. and Tsen F. T. (1996). *Optimización Heurística y Redes Neuronales*. Editorial Paraninfo S.A.
- Feo, T. A. & Resende, M. G. C. (1995). *Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*. Journal of Global Optimization, Vol. 6, pp. 109-133.
- Ferreira, B. H. Aurélio (1987). *Pequeno dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa*. 11ª Edição, Ed. Civilização Brasileira S.A. – Rio de Janeiro.
- Gauche, Coelho & Teive (1999). *A Mixed Back-Propagation/Marquardt-Levenberg Algorithm for Optimizing the Distribution Electrical System Operation*. Proceedings of the 1999 IEEE Transmission and Distribution Conference (New Orleans, 1999), Vol. 2, pp. 753-758.

- Glamocanin, V. (1990). *Optimal Loss Reduction of Distribution Networks*. IEEE Transactions on Power System, Vol. 5, No. 3, pp. 774-782.
- Glover, F. & Laguna, M. (1997). *Tabu Search*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Goldberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley.
- Goswami, S. K. e Basu, S. K. (1992). *A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, pp. 1484-1491.
- Jasmon, J.B., Callistus, L.H. & Lee, C. (1991). *A Modified Technique for Minimization of Distribution System Losses*. Electric Power Systems Research, Vol. 20, pp. 81-88.
- Kim, H., Ko, Y. & Jung, K.H. (1993). *Artificial Neural Network based Feeder Reconfiguration for Loss Reduction in Distribution Systems*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, pp. 1933-1941.
- Kirkpatrick, S., Gelatt C.D. & Vecchi Jr., M.P. (1983). *Optimization by Simulated Annealing*. Science 220 (4598), 671-679.
- Lima, W. S. (1996). *Previsão de Carga no Período de Demanda de Ponta Utilizando Redes Neurais Artificiais*. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica, UNICAMP.
- Lin, W. M. & Chin, H. C. (1998). *A New Approach for Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction and Service Restoration*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, pp. 870-875.
- Liu, C. C. & Lee, S. S. V. (1987). *An Expert System Operational aid for Restoration and Loss Reduction of Distribution Systems*. Proceedings of PICA'87.

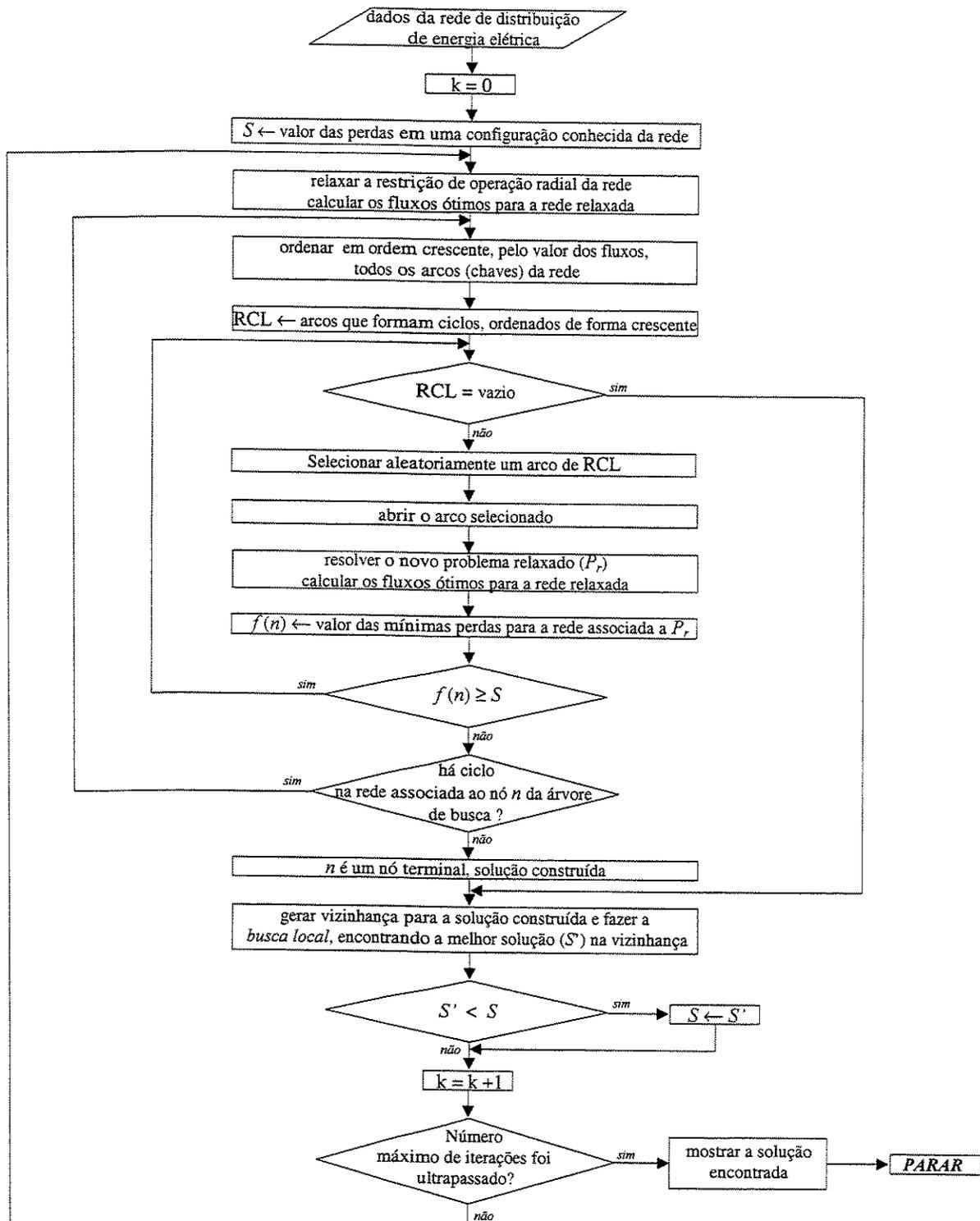
- Luemberger, D. G. (1984). *Linear and Nonlinear Programming*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Lyra Filho, C. & Tavares, H. (1988). A contribution to the midterm scheduling of Large Scale Hydrothermal Power Systems. *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 3, No. 3, pp. 852-857.
- Lyra Filho, C. (1984). *Contribuição ao Planejamento de Produção de Energia Elétrica em Sistemas de Potência*. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Elétrica, UNICAMP.
- Merlin, A. & Back, H. (1975). *Search for a Minimal-Loss Operating Spanning Tree Configuration in an Urban Power Distribution System*. Proc. 5th Power System Computation Conference (PSCC), Cambridge (UK), artigo 1.2/6.
- Monclar, F. R., Verho, P., Järventausta, P. & Partanen, J. (1997). *The Use of Genetic Algorithm for Power Loss Reduction via Reconfiguration of MV Networks*. Intelligent System Application to Power System, ISAP'97 – Seoul, Korea.
- Monticelli, A. (1983). *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. Ed. Edgard Blücher Ltda. – São Paulo.
- Nara, K., Shiose, A., Kitagawa, M. and Ishihara, T. (1992). *Implementation of Genetic Algorithm for Distribution Systems Loss Minimum Re-Configuration*. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.7, No.3, pp. 1044-1051.
- Página da Eletrobás (1999). www.eletrobras.gov.br/energia/consumo.htm. *Consumo Firme por Classe e Região Demográfica*.
- Pearl, J. (1984). *Heuristics: Intelligent search strategies for computer problem solving*. Reading, MA: Addison-Wesley.

- Peponis, G.J., M.P. Papadopoulos and N.D. Hatziargyriou (1996). *Optimal Operation of Distribution Networks*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.11, No.1, pp. 59-67.
- Sarfi, R. J., M. M. A. Salama and A. Y. Chikhani (1994). *A Survey of the State of the Art in Distribution System Reconfiguration for System Loss Reduction*. Electric Power System Research. Vol. 31, pp. 61 – 67.
- Shirmohammadi, D & Hong, H (1989). *Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction*. IEEE Transactions on Power Delivery 4, pp. 1492 – 1498.
- Tão, W., Cavellucci, C. and Lyra Filho, C. (1999), *Parallel Intelligent Search for Loss Minimization in Distribution Systems*. Proceedings of the 1999 IEEE Transmission and Distribution Conference (New Orleans, 1999), Vol.1, pp. 218-222.
- Taylor, T. & LubKerman, D. (1990). *Implementation of Heuristic Search Strategies for Distribution Feeder Reconfiguration*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 1, pp. 239-246.
- Wagner, T.P., Chikhani, A.Y. and Hackam, R. (1991). *Feeder Reconfiguration for Loss Reduction: an Application of Distribution Automation*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 4, pp. 1922 – 1933.

Apêndices

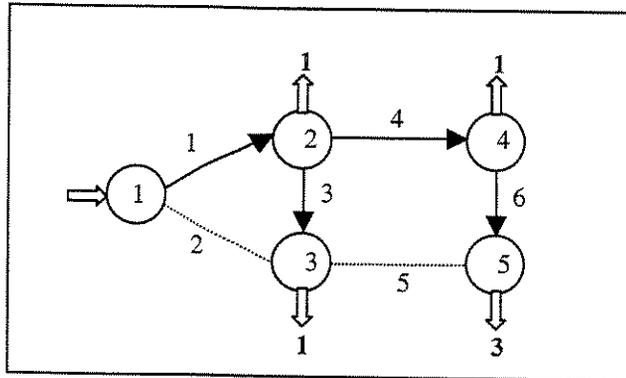
Apêndice 1

Fluxograma para Redução de Perdas através do método GRASP



Apêndice 2

Entrada de Dados para o Programa de Redução de Perdas
Rede Ilustrativa



```
/* <Unidcarga> <numBarras>
```

```
A    5
```

```
/* se nó <num> tipo (20) = SE <cod> <fpot.> <capacidadeMVA>
```

```
1    20    901    1.0    5
```

```
/* se nó <num> tipo (23)= BLC <carga> <fpot.>
```

```
2    23    1      1.0
```

```
3    23    1      1.0
```

```
4    23    1      1.0
```

```
5    23    3      1.0
```

```
/* <arco> <de> <para> <tipo> <estado> <cabo> <capacidade> <comprimento>
```

```
1    1    2    11    1    X09    100    1
```

```
2    1    3    11    1    X09    100    1
```

```
3    2    3    10    0    X09    100    1
```

```
4    2    4    10    1    X09    100    1
```

```
5    3    5    11    1    X09    100    1
```

```
6    4    5    11    0    X09    100    1
```

Apêndice 3

Entrada de Dados para o Programa de Redução de Perdas Rede pBauru

/* <Unidcarga> <numBarras>

kW 65

/* no tipo = SE <cod> <fpot.> <capacidadeMVA> <x> <y>

1 20 900 0.900 100.00 0 0

/* tipo = BLC <carga> <fpot.> <x> <y>

2 23 317.643 0.900 0 0

3 23 180.889 0.900 0 0

4 23 143.592 0.900 0 0

5 23 136.133 0.900 0 0

6 23 248.022 0.900 0 0

7 23 118.728 0.900 0 0

8 23 67.755 0.900 0 0

9 23 113.755 0.900 0 0

10 23 109.403 0.900 0 0

11 23 22.378 0.900 0 0

12 23 23.621 0.900 0 0

13 23 37.918 0.900 0 0

14 23 32.945 0.900 0 0

15 23 26.729 0.900 0 0

16 23 41.026 0.900 0 0

22 23 54.702 0.900 0 0

23 23 266.671 0.900 0 0

24 23 62.783 0.900 0 0

25 23 44.134 0.900 0 0

26 23 81.431 0.900 0 0

27 23 331.318 0.900 0 0

28 23 88.890 0.900 0 0

29 23 154.159 0.900 0 0

30 23 85.782 0.900 0 0

31 23 19.270 0.900 0 0

32	23	62.783	0.900	0	0
33	23	39.161	0.900	0	0
34	23	73.350	0.900	0	0
35	23	572.503	0.900	0	0
36	23	50.350	0.900	0	0
37	23	173.429	0.900	0	0
38	23	109.403	0.900	0	0
39	23	123.700	0.900	0	0
40	23	105.052	0.900	0	0
41	23	50.350	0.900	0	0
42	23	115.619	0.900	0	0
43	23	216.320	0.900	0	0
44	23	389.128	0.900	0	0
45	23	283.454	0.900	0	0
46	23	118.728	0.900	0	0
47	23	53.458	0.900	0	0
48	23	1169.248	0.900	0	0
49	23	2553.574	0.900	0	0
50	23	110.647	0.900	0	0
51	23	98.836	0.900	0	0
52	23	4.973	0.900	0	0
53	23	160.375	0.900	0	0
54	23	16.162	0.900	0	0
55	23	98.214	0.900	0	0
56	23	2797.866	0.900	0	0
57	23	386.020	0.900	0	0
58	23	92.620	0.900	0	0
59	23	869.011	0.900	0	0
60	23	11.189	0.900	0	0
61	23	50.350	0.900	0	0
62	23	57.810	0.900	0	0
63	23	64.647	0.900	0	0
64	23	20.513	0.900	0	0
65	23	423.316	0.900	0	0
66	23	662.636	0.900	0	0
67	23	665.744	0.900	0	0
68	23	291.535	0.900	0	0
69	23	541.422	0.900	0	0
70	23	272.265	0.900	0	0

/* arco de para tipo estado cabo capacidade comprimento x y

1 1 2 11 1 A47 400 1632 9999
2 1 39 11 1 A33 400 1676 9999
3 1 53 11 1 A47 400 1735 9999
4 1 59 11 1 A33 400 1180 9999
5 2 3 11 1 A47 400 1241 9999
6 3 4 11 1 A47 400 571 9999
7 4 5 11 1 A47 400 871 9999
8 5 6 11 1 A02 400 769 9999
9 5 25 11 1 A02 400 419 9999
10 5 37 11 1 A02 400 302 9999
11 6 8 11 1 A02 400 262 9999
12 6 7 11 1 A02 400 813 9999
13 8 9 11 1 A02 400 392 9999
14 8 23 11 1 A02 400 375 9999
15 9 10 11 1 A02 400 335 9999
16 10 11 11 1 A02 400 529 9999
17 10 22 11 1 A02 400 505 9999
18 11 12 11 1 A02 400 409 9999
19 11 13 11 1 A02 400 605 9999
22 13 14 11 1 A02 400 794 9999
24 14 15 11 1 A02 400 608 9999
25 14 16 11 1 A02 400 317 9999
32 22 16 11 0 A02 400 768 9999
33 24 8 11 0 A02 400 246 9999
34 25 24 11 1 A02 400 400 9999
35 25 26 11 1 A02 400 306 9999
36 25 27 11 1 A02 400 498 9999
37 25 38 11 1 A02 400 355 9999
38 27 28 11 1 A02 400 781 9999
39 27 30 11 1 A02 400 171 9999
40 28 29 11 1 A10 400 396 9999
43 30 31 11 1 A02 400 571 9999
44 30 32 11 1 A47 400 381 9999
46 33 27 11 0 A02 400 414 9999
47 33 34 11 0 A02 400 510 9999
48 34 35 11 1 A02 400 260 9999
49 34 36 11 1 A02 400 412 9999
50 36 47 11 0 A02 400 163 9999
51 37 38 11 0 A02 400 199 9999

52 37 33 11 0 A02 400 306 9999
53 39 40 11 1 A33 400 778 9999
54 39 50 11 1 A02 400 372 9999
55 40 41 11 1 A33 400 351 9999
56 41 3 11 0 A33 400 220 9999
57 41 42 11 1 A33 400 315 9999
58 42 43 11 1 A33 400 567 9999
59 42 46 11 1 A33 400 780 9999
60 43 4 11 0 A33 400 596 9999
61 43 44 11 1 A33 400 194 9999
62 44 45 11 1 A33 400 315 9999
63 44 34 11 1 A33 400 609 9999
64 45 5 11 0 A33 400 204 9999
65 45 33 11 1 A02 400 644 9999
66 46 47 11 1 A33 400 293 9999
68 47 48 11 1 A33 400 733 9999
69 48 49 11 1 A33 400 956 9999
70 49 52 11 1 A33 400 370 9999
71 50 53 11 0 A02 400 588 9999
72 50 40 11 0 A02 400 516 9999
73 50 51 11 1 A02 400 368 9999
74 51 55 11 1 A02 400 538 9999
75 53 54 11 1 A47 400 771 9999
76 54 55 11 0 A33 400 720 9999
77 55 56 11 1 A33 400 770 9999
78 56 57 11 1 A33 400 477 9999
79 56 58 11 1 A02 400 710 9999
80 57 46 11 0 A33 400 598 9999
81 57 42 11 0 A02 400 452 9999
82 59 61 11 1 A02 400 626 9999
83 59 60 11 1 A33 400 1899 9999
85 62 63 11 1 A47 400 823 9999
86 62 66 11 1 A47 400 513 9999
87 62 65 11 1 A02 400 1226 9999
88 62 70 11 1 A47 400 222 9999
89 61 62 11 1 A33 400 977 9999
90 63 64 11 1 A02 400 2135 9999
91 65 48 11 0 A02 400 592 9999
92 66 67 11 1 A47 400 1327 9999
93 66 69 11 1 A47 400 1148 9999

94 67 68 11 1 A33 400 413 9999
95 70 69 11 0 A33 400 399 9999
96 68 69 11 0 A02 400 1000 9999