

XVI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**Reconfigurador de Redes de Distribuição para Reduzir Perdas Considerando as Variações das Demandas**

E. A. Bueno, C. Lyra Filho – UNICAMP e C. Cavellucci – Thoth Consultoria

E-mail: edilson@densis.fee.unicamp.br , chrlyra@densis.fee.unicamp.br e thoth@mpc.com.br

Palavras-chave – Métodos Heurísticos, Otimização Combinatória, Redução de Perdas, Sistema de Distribuição, Variações de Demandas.

Resumo – Este trabalho discute o problema de redução das perdas técnicas, por reconfiguração de redes, considerando as variações das cargas do sistema de distribuição e impondo a restrição de manter inalterada a configuração ao longo de um período de planejamento. Duas metodologias para abordagem do problema são apresentadas. A primeira, denominada Busca Menor Energia, é inspirada na técnica de Abertura Seqüencial de Chaves. A segunda, denominada Troca de Ramos Generalizada, é instigada pela técnica de Troca de Ramos. Finalmente, na busca de soluções com perdas reduzidas, combinam-se as duas metodologias visando explorar as vantagens de cada uma. Estudos de casos mostram a aplicabilidade da técnica desenvolvida.

Abstract – This work presents a contribution to non-commercial loss reduction problem, by network reconfigurations, considering the constraint of keeping a fixed configuration for the planning period. Two approaches to problem are presented. The first, named Minimum Energy Search is inspired in the Sequential Switch Opening technique. Second, denoted Branch Exchange by Energy follows the general ideas of the Branch – Exchange technique. Finally, there techniques are coordinated in a procedure that tries to explore the advantages of each one in achieving better loss reduction. Cases studies illustrate the application of the methodology.

1. INTRODUÇÃO

As perdas de redes de distribuição contribuem para aumentar o custo operacional do sistema, exigindo a antecipação de investimentos com objetivo de manter a qualidade do serviço. Elas são inerentes ao sistema de distribuição, porém, utilizando metodologias adequadas existe a possibilidade de planejar ações eficazes para reduzi-las.

Reduções das perdas técnicas em sistemas de distribuição de energia elétrica podem ser obtidas por meio de três linhas de atuação: substituição das linhas e equipamentos, modificações na carga e reconfigurações das redes. Linhas e equipamentos podem contribuir para a redução das perdas usando-se materiais de menores resistências ou elevando-se os níveis de tensão do sistema (Cipoli, Marco, Simão, Fronterrota, Gramulia Jr., e Oliveira, 2002). Modificações das cargas podem ser alcançadas por instalações de bancos capacitores em pontos adequados, dimensionados de forma a injetar as energias reativas necessárias (Mendes, França, Lyra, Pissarra, e Cavellucci, 2002; Vizcaino, 2003); pode-se também modificar cargas através de incentivos a mudanças de hábito dos consumidores. Reconfigurações das redes por meio de aberturas e fechamento de chaves podem levar aos caminhos de menores resistências para atendimento de uma determinada demanda de energia (Lyra, Pissarra, e Cavellucci, 2002). Em horizontes acima de três anos, todas as alternativas podem ser exploradas, para obtenção dos melhores benefícios. Em prazos menores, as alternativas mais atraentes são reconfigurações das redes e instalação de bancos capacitores.

Como resultado direto da redução das perdas tem-se o aumento da energia disponível. Indiretamente, tem-se também o melhor condicionamento das tensões ao longo dos circuitos de distribuição, obtendo-se a diminuição do custo operacional da rede. As condições de operação também são melhoradas – redes com valores baixos de perdas tendem suportar melhor as possíveis falhas do sistema.

Os aspectos positivos das configurações de operação com perdas reduzidas e o uso de procedimentos de reconfigurações de redes de distribuição para encontrar essas configurações, foram visualizados inicialmente pelos engenheiros franceses Merlin e Back (1975). Esses autores apresentaram duas alternativas para abordagem do problema de reduções de perdas técnicas. A primeira, aproximada e mais eficiente do ponto de vista do desempenho computacional, usa a distribuição ótima dos fluxos de potência em redes com ciclos para construir progressivamente uma solução radial; a segunda, exata e aplicável apenas em redes de pequeno porte, encontra uma configuração de mínimas perdas através do método branch-and-bound (Nemhauser e Wolsey, 1988).

A metodologia aproximada proposta por Merlin e Back (1975), também conhecida como “Abertura Sequencial de Chaves”, foi posteriormente aperfeiçoada por Shirmohammadi e Hong (1989). Paralelamente, surgia a metodologia conhecida por “Troca de Ramos” (*Branch-Exchange*), proposta por Civanlar, Grainger e Lee (1988), onde as perdas são reduzidas através de mudanças de configurações por abertura e fechamento de chaves (troca de ramos), convergindo quando não há mais

reduções de perdas significativas. Baran e Wu (1989) aperfeiçoaram e divulgaram amplamente a abordagem de Civanlar, Grainger, e Lee (1988).

Muitas outras abordagens surgiram para o problema de redução de perdas em redes de distribuição de energia elétrica, como podemos observar em Lyra Filho, Pissarra, e Cavellucci. (2000). A maior parte das aplicações bem sucedidas usam métodos aproximados, cabendo destaque as duas técnicas apresentadas anteriormente, *abertura seqüencial de chaves* e *troca de ramos*. Alguns autores observaram as vantagens de explorar conjuntamente os dois métodos. Augugliaro, Dusonchet e Mangione (1995), propõem um método heurístico de duas fases, baseado numa abordagem de otimização do tipo “gulosa”. Na primeira fase um método semelhante à *abertura seqüencial de chaves* é utilizado, os fluxos de potências são calculados através do método Newton-Raphson. A partir da configuração de rede criada, um processo de melhoria da solução é adotado baseado no método *troca de ramos*.

Cavellucci e Lyra (1997) apoiaram-se na união de técnicas de otimização não linear em grafos e métodos de buscas informadas (técnicas desenvolvidas na área de inteligência artificial), objetivando encontrar um ótimo global para o problema de minimização de perdas em redes de distribuição. Observaram que sua abordagem pode ser interpretada como a união da *abertura seqüencial de chaves* e *troca de ramos*. Lyra, Pissarra, e Cavellucci (2003) propõe um procedimento de duas fases, que amplia o método proposto por Cavellucci e Lyra (1997) no sentido de tratar sistemas de distribuição reais de grande porte.

A maioria dos trabalhos sobre o problema de redução de perdas utiliza a abordagem por demanda fixa. A consideração das variações das cargas ao longo de um período apresentada na literatura da área ainda é escassa e com trabalhos incipientes. Quase todas as abordagens observando as variações das cargas ao longo de um período permitem alterar a configuração no período (Lee e Brooks, 1988; Broadwater Khan, Shalann e Lee, 1993; Chen e Cho, 1993; Zhou, Shirmohammadi e Liu, 1997; Taleski e Rajičić, 1997; Huang e Chin, 2002; Vargas, Lyra Filho, e Von Zuben, 2002 e López, Opazo e Bastard, 2004).

Bueno e Lyra (2002), abordam o problema de redução de perdas por reconfigurações, considerando as variações das demandas e procurando evitar chaveamentos excessivos, através da busca da melhor configuração fixa para todo o período de planejamento. Este trabalho elabora os conceitos apresentados por Bueno e Lyra (2002). Dois algoritmos são propostos, *Busca Menor Energia*, inspirada na metodologia de abertura seqüencial de chaves, e *Troca de Ramos Generalizada*, desenvolvida a partir da metodologia troca de ramos. Esses algoritmos são combinados para resolver o problema de redução de perdas com demandas variáveis e configuração fixa, de forma semelhante ao proposto por Lyra, Pissarra, e Cavellucci (2003) para demandas fixas.

O próximo item apresenta a formulação matemática do problema. A Seção 3 apresenta a primeira proposta de abordagem para o problema com demandas variáveis, a “Busca Menor Energia”. A Seção 4 apresenta a segunda proposta, “Troca de Ramos Generalizada”. Uma abordagem para reconfigurar a

rede combinando as duas técnicas é apresentada na Seção 5. A Seção 6 apresenta estudos de casos. Discussões finalizam o artigo.

2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A Fig. 1 apresenta um diagrama unifilar simplificado de uma rede de distribuição primária de energia elétrica, destacando as entidades mais relevantes para o problema de redução de perdas. São elas: subestações (SE), linhas elétricas (L), chaves (CH) e os consumidores, agrupados em blocos de carga (BC).

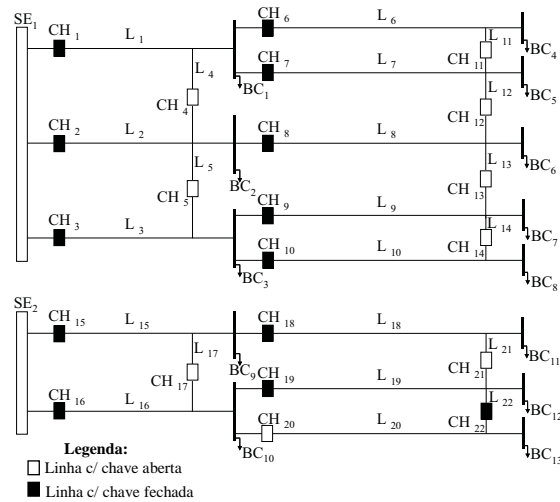


Figura 1: Rede de distribuição de energia elétrica.

Modela-se a rede de distribuição através de uma estrutura de grafos $\mathcal{G} = [\mathcal{N}, \mathcal{A}]$ (Ahuja, Magnanti e Orlin, 1993), onde \mathcal{N} representa o conjunto de nós e \mathcal{A} é o conjunto de arcos. A Fig. 2 apresenta a representação por grafo da rede de distribuição primária da Fig. 1.

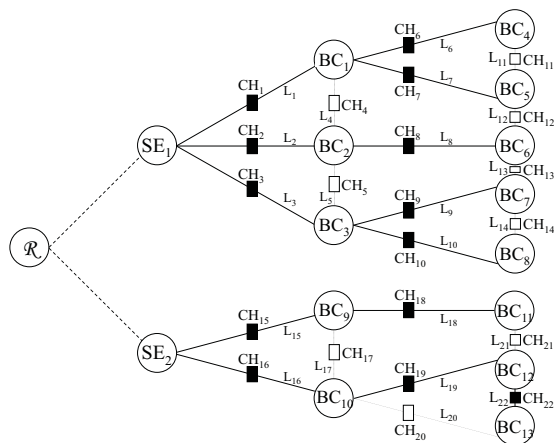


Figura 2: Representação da rede de distribuição em grafo.

Os nós estão associados a blocos de carga ou subestações (um nó artificial raiz, \mathcal{R} , é incluído para evitar dificuldades no tratamento de conectividade da rede). Os arcos estão associados a linhas ou a chaves – arcos que conectam as subestações ao nó raiz podem ser identificados com a rede de

transmissão. Usualmente, uma configuração factível para operação de uma rede de distribuição é caracterizada por uma “arvore” (Ahuja, Magnanti e Orlin, 1993), conseqüência da restrição de radialidade.

2.1. Cálculo dos Fluxos de Potência

A Fig. 3 apresenta um alimentador da rede de distribuição de energia elétrica com n barras (nós).

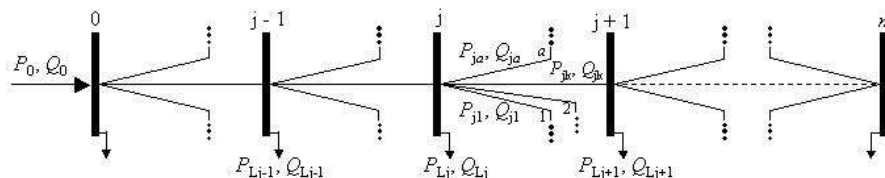


Figura 3: Alimentador de uma rede de distribuição.

Os fluxos de potência numa rede de distribuição de energia elétrica podem ser determinados através das equações de fluxos de potências para redes radiais (Baran e Wu, 1989). As fórmulas para o cálculo dos fluxos, apresentadas nas Equações (1) são simplificadas, mas contemplam as ramificações das barras – supõe-se conhecidas as cargas ativas e reativas em todos os barramentos, e as tensões nas subestações

$$P_{j+1} = \sum_{k=1}^a P_{jk} - P_{Lj+1} \quad (a)$$

$$Q_{j+1} = \sum_{k=1}^a Q_{jk} - Q_{Lj+1} \quad (b) \quad (1)$$

$$V_{jk}^2 = V_j^2 - 2(r_{jk} P_{jk} + x_{jk} Q_{jk}) \quad (c)$$

No conjunto de Equações (1) j representa as barras (nós) do sistema; k são os ramos (arcos) do sistema; a é o número total de ramos que sai da barra j ; n é o número total de barras (nós) na rede; P_{jk} é a potência ativa no ramo k que sai da barra j ; P_{Lj} é a potência ativa consumida pela carga na barra j ; Q_{jk} é a potência reativa no ramo k que sai da barra j ; Q_{Lj} é a potência reativa consumida pela carga na barra j ; V_j é a amplitude da tensão na barra j ; V_{jk} é a amplitude da tensão na barra j através do ramo k ; r_{jk} é a resistência no ramo k que sai da barra j ; x_{jk} é a reatância indutiva no ramo k que sai da barra j .

2.2. Formulação Matemática para o Problema com Demandas Variáveis

As perdas elétricas (potência dissipada) na rede são proporcionais ao quadrado das correntes que fluem pelas linhas e suas respectivas resistências. A corrente elétrica que circula pelos condutores do sistema de distribuição pode ser dividida em dois componentes. Um componente em fase, necessária ao transporte da potência ativa e um componente em quadratura, associada aos fluxos de potências reativas.

Como a magnitude da tensão nos ramos da rede de distribuição, em p.u., é aproximadamente uma unidade, é usual adotar-se uma simplificação, supondo a tensão constante em um p.u. (Baran e Wu,

1989). Essa simplificação torna desnecessária a Equação (1.c). Quando as cargas são bem compensadas, as potências reativas podem ser consideradas aproximadamente proporcionais as potências ativas. Sob esta hipótese, observa-se que as Equações de fluxos (1.a) e (1.b) são equivalentes.

A grande maioria dos trabalhos traz formulações que consideram, geralmente, as demandas fixas em valores iguais aos picos das curvas de cargas. Alguns trabalhos levam em conta as variações das demandas, no entanto, consideram variações proporcionais das demandas. Resolver o problema de redução de perdas em redes de distribuição de energia elétrica com demandas variáveis, considerando que as demandas sofrem variações uniformes ao longo de um determinado período, é equivalente a resolver o problema para demandas fixas e, no final do processo de otimização, multiplicar o valor das perdas por uma constante (Bueno, Lyra e Cavellucci, 2003).

Fazendo-se uso das simplificações apresentadas, a formulação matemática para o problema de minimização de perdas elétricas em redes de distribuição de energia considerando as demandas variáveis (conhecidas), e supondo que a curva de carga pode ser dividida em t intervalos, pode ser expressa como mostra as equações a seguir,

$$\begin{aligned} & \text{Min}_{C_v} \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^a \Delta_i (r_{jk} P_{ijk}^2) \\ & \text{s.a:} \\ & \begin{array}{ll} \mathbf{P}_{dv} & \mathbf{P}_{dvcf} \\ \text{(reconfigurações livres)} & \text{(configuração fixa)} \\ \mathbf{A} \cdot \mathbf{C}_i \cdot \mathbf{P}_i = \mathbf{b}_i & \mathbf{A} \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{P}_i = \mathbf{b}_i \\ \underline{P}_i \leq P_i \leq \bar{P}_i & \underline{P}_i \leq P_i \leq \bar{P}_i \\ \mathcal{G}_i = [\mathcal{N}, \mathcal{A}'_i] \text{ é uma árvore} & \mathcal{G} = [\mathcal{N}, \mathcal{A}'] \text{ é uma árvore} \end{array} \end{aligned}$$

Nas formulações acima \mathbf{A} é a matriz de incidência nó-arco do grafo representando o sistema de distribuição; t é a constante que indica o número de intervalos de tempo considerado; Δ_i é a duração do i -ésimo intervalo de tempo; \mathbf{C}_i é a matriz que representa a configuração de rede no intervalo i ; \mathbf{C} é uma matriz quadrada e diagonal, onde a diagonal é o vetor de estado das chaves do sistema (\mathbf{C}_v). A denotação \mathbf{C} sem o índice, representa a configuração fixa da rede; \mathbf{P}_i é o vetor de fluxos de potência no intervalo i ; \mathbf{b}_i é o vetor de cargas nos nós no intervalo i ; \mathcal{A}'_i é o conjunto de arcos com fluxos diferentes de zero representando todas as chaves fechadas no intervalo i ; \mathcal{A}' é conjunto de arcos representando as chaves fechadas em todos os intervalos de tempo – imposição da configuração fixa.

O vetor \mathbf{C}_v , com dimensão do número de arcos da rede, é formado por componentes binárias, sendo 0 para as chaves abertas e 1 para as chaves fechadas. Cabe lembrar que nem todos os arcos são chaves - os elementos de \mathbf{C}_v que não representam chaves têm seus valores fixados em 1. Supõe-se que a injeção de potência na rede é igual a potência necessária para suprir todas as demandas nos nós, ou seja, $\sum \mathbf{b}_j = 0$ (\mathbf{b}_j são componentes do vetor \mathbf{b}).

Pode-se observar que a diferença entre as formulações dos problemas P_{dv} e P_{dvcf} é sutil. O problema P_{dv} é desacoplado, caracteriza-se o desacoplamento dos intervalos de planejamento pelas matrizes C_i – uma para cada um dos intervalos Δ_i . Por outro lado, P_{dvcf} é acoplado, sendo o acoplamento dos intervalos determinado pela matriz C – constante para todos os intervalos no horizonte de planejamento. Nota-se que o acoplamento impede tratar cada perfil de demanda como um problema separável. Conseqüentemente, aumenta significativamente a dimensão de P_{dvcf} em relação a P_{dv} .

O principal objetivo de investigação deste trabalho é o desenvolvimento de metodologias para abordar o problema P_{dvcf} . Propostas nessa direção são a “Busca Menor Energia”, inspirada no algoritmo de Abertura Seqüencial de Chaves e a “Troca de Ramos Generalizada”, baseada no algoritmo “Troca de Ramos”.

3. BUSCA MENOR ENERGIA – BME

O método *Abertura Seqüencial de Chaves*, proposto por Merlin e Back (1975), consiste na aplicação sucessiva das etapas,

- encontrar a melhor distribuição de fluxos para a rede com anéis;
- abrir a chave com menor fluxo de potência;

essas etapas são repetidas sucessivamente, até a obtenção de uma solução radial.

Ressalta-se como aspecto positivo da abordagem abertura seqüencial de chaves, o fato de que a obtenção de uma solução de poucas perdas independe de configurações radiais já conhecidas para operação da rede.

Inspirado na metodologia *Abertura Seqüencial de Chaves*, Cavellucci e Lyra (1997) desenvolveram um método para o problema de reconfigurações para a redução das perdas, utilizando a formalização de buscas em espaço de estados da área de inteligência artificial (Pearl, 1984). A BME foi concebida utilizando estes conceitos e baseando-se na heurística de otimização do tipo “gulosa”. Os passos a seguir resumem a Busca Menor Energia (BME).

Passo 1 Calcular os fluxos de potências ótimos para todas as situações de cargas, sem a restrição de radialidade (P_r) e transformar todos os fluxos calculados em energia, considerando os intervalos de duração das cargas.

Passo 2 Calcular a energia total, associada a cada arco durante o período de planejamento (a energia total associada a um certo arco é a soma das energias que fluem no mesmo, considerando cada um dos intervalos).

Passo 3 Verificar a existência de ciclos. Se não existirem ciclos, PARAR e mostrar a solução do problema. Caso contrário, continuar na *Passo 4*.

Passo 4 Obter o conjunto M , contendo todos os arcos que pertencem a pelo menos um ciclo.

Passo 5 Identificar o arco k pertencente a conjunto M que possua o menor valor associado de energia. Obter a configuração de rede resultante pela remoção do arco k (isto é, abrir a chave representada pelo arco k).

Passo 6 Voltar para a *Passo 1*.

4. TROCA DE RAMOS GENERALIZADA – TRG

O objetivo da TRG é procurar em uma vizinhança da configuração de operação uma nova configuração de rede radial que apresente valores reduzidos das perdas, com as demandas sofrendo variações no período de planejamento.

O método de troca de ramos proposto inicialmente por Civanlar, Grainger, Yin e Lee (1988), inicia o processo de redução de perdas com uma configuração de operação radial. Através de chaveamentos (troca de ramos), modifica as configurações na tentativa de reduzir as perdas resistivas, sem perder a radialidade da rede. Os autores apresentaram algumas condições para se identificar na rede os chaveamentos promissores. As condições podem ser resumidas em dois pontos:

- há possibilidades de redução de perdas se houver uma diferença de tensão significativa entre os terminais (nós) de uma chave aberta;
- a redução de perdas é alcançada com a transferência de cargas do terminal de tensão mais baixa para o terminal de tensão mais alta.

Este método foi posteriormente aperfeiçoado por Baran e Wu (1989), usando estimativas das perdas em termos das potências ativa e reativa. Essas idéias permitem generalizações do método troca de ramos para abordagem do problema P_{dvcf} . A generalização do método corresponde a consideração das perdas em energia ao longo do período. De forma simplificada, o algoritmo *Troca de Ramos Generalizada* (TRG) é apresentado na seqüência de passos a seguir.

Passo 01 A partir de uma configuração de operação radial da rede de distribuição determina-se o ponto de operação, calculando o fluxo de potência para todas as situações de carga.

Passo 02 Para cada chave aberta k ,

- identificar o ciclo formado com o fechamento da chave e
- selecionar a chave m pertencente ao ciclo que apresente a maior redução de perdas, de forma semelhante a adotada por Civanlar, Grainger, Yin e Lee (1988) ou Baran e Wu (1989); inclua m no conjunto de chaves candidatas M .

Passo 03 Selecionar a chave m pertencente ao conjunto de chaves candidatas M , que apresente a maior redução de perdas e satisfaça as restrições de factibilidade. Se o conjunto M estiver vazio, PARAR e mostrar a solução do problema.

Passo 04 Obter a nova configuração de rede e retornar ao *Passo 2*.

5. RECONFIGURADOR DE REDES POR ENERGIA – RRE

As metodologias estendidas para o problema de redução de perdas onde as variações das demandas são consideradas (BME e TRG) podem ser combinadas com a finalidade de explorar as vantagens de cada uma. Denomina-se a composição das duas abordagens *Reconfigurador de Redes por Energia – RRE*.

A composição das abordagens é realizada através de um procedimento em duas fases. Na primeira, a BME realiza uma sondagem no espaço de soluções, buscando uma solução independente da configuração de rede inicial. Na segunda fase, utilizando o algoritmo TRG, realiza-se uma busca local na melhor configuração encontrada na fase anterior. Na segunda fase representa-se explicitamente as cargas ativas e reativas para considerar eventuais características de má compensação de reativos.

6. ESTUDO DE CASOS

O estudo de casos apresentado a seguir tem como objetivo avaliar o procedimento RRE quanto a sua aplicação ao problema de redução de perdas, considerando as variações de carga e mantendo fixa a configuração ao longo de um período de tempo. Os algoritmos foram codificados em linguagem C++, utilizando o compilador Borland C++ Builder V5.0. Os resultados foram obtidos em um computador Pentium 4 1,7 GHz, usando sistema operacional Windows 2000.

Os testes iniciais foram realizados com a rede ilustrada na Fig. 04, de Baran e Wu (1989). A rede contém 33 nós e 37 arcos.

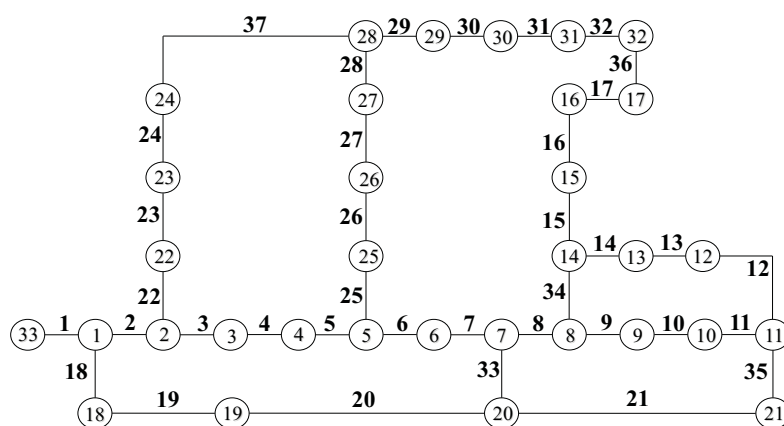


Figura 4: Rede de Teste A (Baran e Wu, 1989).

São considerados perfis de carga alto, médio e baixo, com duração de 2, 12 e 10 horas, respectivamente, para um período de planejamento de um dia. O perfil de carga alto tem as cargas nos nós com os máximos valores das demandas. As demandas dos nós no perfil de carga médio são obtidas por reduções aleatórias de 10 % em relação ao perfil de carga alto. No caso do perfil de carga baixo, foram aplicadas reduções aleatórias de 10 e 20%, nas demandas máximas dos nós.

Considerando o perfil de carga descrito, a configuração e valores das perdas encontrados pelo RRE são apresentados na Tabela 1, que apresenta também a configuração e as perdas iniciais.

Tabela 1. Perdas nas configurações *inicial* e obtida pelo *RRE*.

Configuração	Chaves Abertas	Perdas (kWh)
<i>Inicial</i>	20, 34, 35, 36 e 37	2.864,65
<i>Reconfigurador</i>	11, 14, 28, 33 e 36	1.599,64

Para os perfis apresentados, a configuração de operação sugerida pelo RRE é formada por uma rede radial com os valores das perdas reduzidas aproximadamente 44% em relação a solução inicial.

Um segundo teste foi elaborado para quantificar eventuais ganhos com a variação das configurações ao longo do período de estudo. Foram obtidas as melhores configurações, cada uma delas considerando apenas um perfil de carga – a primeira configuração foi obtida para o perfil de carga alta, a segunda para a carga média e a última para carga baixa. Fez-se a somatória das perdas de cada um dos perfis, resultando em um montante de 1.593,35 kWh, isto corresponde uma redução de perdas de aproximadamente 0,5%, em relação à solução obtida com a restrição de configuração fixa. Porém, para manter esse nível de perdas seriam necessários quatro chaveamentos diários.

Redes com dimensão semelhante a redes reais de grande porte foram utilizadas com o objetivo de verificar o desempenho computacional do RRE. A primeira rede denominada rede *A*, contém 1.528 nós e 1.558 arcos (equivalente a uma cidade com 40 mil habitantes); a segunda, denominada rede *B*, contém 2.274 nós e 2.316 (equivalente a uma cidade com 80 mil habitantes). Os testes são realizados com 4 perfis de carga tendo duração de 5, 7, 8 e 4 horas cada perfil.

A Tabela 2 mostra os valores das perdas nas configurações iniciais, valores das perdas nas configurações finais e a reduções percentuais obtidas pelo RRE.

Tabela 2. Perdas nas redes *A* e *B*.

	Perdas Iniciais (kWh)	Perdas Finais (kWh)	Reduções (%)
Rede <i>A</i>	7.917,07	6.497,84	17,93
Rede <i>B</i>	25.236,61	22.901,39	9,25

O tempo de execução dessas instâncias foi de aproximadamente 1 e 8 minutos para as redes *A* e *B*, respectivamente. Observa-se que o reconfigurador conseguiu obter reduções significativas para as duas redes de teste com tempo computacional adequado, considerando-se a grande dimensão do problema.

7. CONCLUSÕES

O trabalho acrescenta uma contribuição para o problema de redução de perdas técnicas em sistemas de distribuição de energia elétrica através de reconfigurações de redes, considerando explicitamente as variações das demandas em um período de planejamento. A identificação e formulação deste problema foram discutidas em trabalho anterior de Bueno e Lyra (2002). Este trabalho apresenta metodologias apropriadas para solução do problema.

São revistas as formulações matemáticas para o problema, considerando-se graus de liberdade distintos em relação à operação da rede. Na situação de maior liberdade, as redes podem ser reconfiguradas livremente para se adequarem às variações de demanda. No caso mais restrito as redes devem operar com configuração fixa para um período de planejamento onde as cargas são variáveis.

Dois procedimentos computacionais para o problema com restrição de configuração fixa foram propostos, *Busca Menor Energia*, inspirado no método Abertura Seqüencial de Chaves, e *Troca de Ramos Generalizado*, baseado no método Troca de Ramos. Essas abordagens foram utilizadas de forma coordenada no método *Reconfigurador de Redes por Energia*. Estudos de casos permitiram verificar a validade e o desempenho computacional da metodologia proposta.

Agradecimentos

Este trabalho teve o apoio da CNPq, entidade do governo brasileiro voltada para pesquisa e desenvolvimento.

8. 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., Dusonchet, L., & Mangione, S. (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, April 1989, pp. 1401-1407.

Broadwater, R. P., Khan, A. H., Shalann, H. E. & Lee, R. E. (1993). *Time Varying Load Analysis to Reduce Distribution Losses through Reconfiguration*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 1, January 1993, pp. 294 – 300.

Bueno, E. A., Lyra, C. (2002). *O Impacto das Variações das Cargas ao Longo de um Dia sobre as Perdas em Sistemas de Distribuição*. *Anais do XV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI*. Salvador, Bahia.

Bueno, E. A., Lyra, C. & Cavellucci, C. (2003). *Redução de Perdas por Reconfigurações em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com Demandas Variáveis*. *Anais do XXXV SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Natal – RN.

Cavellucci, C. & Lyra Filho, C. (1997). *Minimization of Energy Losses in Electric Power Distribution Systems by Intelligent Search Strategies*. *International Transactions in Operational Research*, 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 (3), pp.1246-1253.

Cipoli, J. A., Marco, M. A., Simão, N., Fronterrota, S. E., Gramulia Jr., J. & Oliveira, L. C. (2002). *Metodologia para Avaliação e Medição das Perdas Técnicas, Comerciais e Totais da Distribuição*. Anais do XV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI. Salvador, Bahia.

Civanlar, S., J. J. Grainger, H. Yin & S.S.H. Lee (1988). *Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, July 1988, pp. 1217-1223.

Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The University of Michigan Press.

Huang, K.-Y., Chin, H.-C.(2002). *Distribution Feeder Energy Conservation by using Heuristics Fuzzy Approach*. Electrical Power and Energy Systems, Vol. 24, PP. 439-445.

Lee, R. E. & Brooks, C. L. (1988). *A Method and Its Application to Evaluate Automated Distribution Control*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, PP: 1232 - 1238.

López, E., Opazo, H., García, L. & Bastard, P. (2004). *Online Reconfiguration Considering Variability Demand: Applications to Real Networks*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 1, February 2004, pp. 549 – 553.

Lyra Filho, C., Pissarra, C. & Cavellucci, C. (2000). *Redução de Perdas na Distribuição de Energia Elétrica*. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Automática – CBA.

Lyra Filho, C., Pissarra, C. & Cavellucci, C. (2002). *Perspectiva “Zoom” para Redução de Perdas na Distribuição de Energia Elétrica*. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automática – CBA.

Lyra, C., Pissarra, C. & Cavellucci, C. (2003). *Informed Searches Uncover Paths Enhance Energy Output in Power Distribution Networks*. Proceedings of the Twelveth Intelligent Systems Application to Power Systems (ISAP/2003), Lemnos, Greece.

Mendes, A. S., França, P., Lyra, C. Pissarra, C. & Cavellucci, C. (2002). *An Evolutionary Approach for Capacitor Placement in Distribution Network*. Proceeding of Third International Symposium on Engineering of Intelligent Systems. Natural and Artificial Intelligence Systems Organizations (NAISO), Malaga, Spain.

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.

Nemhauser, G. L. & Wolsey, L. A. (1988). *Integer and Combinatorial Optimization*, Wiley, New York, USA.

Pearl, J. (1984). *Heuristic: intelligent search strategies for computer problem solving*. Reading, MA: Adison-Wesley.

Shirmohammadi, D & Hong, H (1989). *Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 1492 – 1498.

Taleski, R. & Rajičić, D. (1997). *Distribution Network Reconfiguration for Energy Loss Reduction*. IEEE Transactions on Power System, Vol. 12, No. 1, pp. 398 - 406.

Vargas, P. A., Lyra Filho, C. & Von Zuben, F. J. (2002). *Learning Classifiers on Guard Against Losses in Distribution Networks*. IEEE/PES T&D 2002 Latin America.

Vizcaino, J. F. (2003), *Redução de Perdas em Redes Primárias de Distribuição de Energia Elétrica por Localização e Controle de Capacitores*. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP. Campinas, SP.

Zadeh, L. A. (1965). *Fuzzy Sets Information and Control*, Vol. 8, pp. 338-353.

Zhou, Q., Shirmohammadi, D. & Liu, W. H. E. (1997). *Distribution Feeder Reconfiguration for Operation Cost Reduction*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.12, No. 2, pp. 730-735.