

# Abordagem Unificada para a Instalação de Capacitores e Reconfigurações com Objetivo de Redução de Perdas

L. R. Manhaes, CPFL; C. Cavellucci, THOTH; C. Lyra Filho, UNICAMP; C. P. Fernandes, UNICAMP e P. M. França, UNICAMP

## RESUMO

Este artigo apresenta os principais resultados obtidos com o uso da abordagem coordenada da reconfiguração associada a instalação de capacitores para a redução das perdas em sistemas de energia elétrica.

## PALAVRAS-CHAVE

Redução das perdas, reconfiguração, instalação de capacitores, inteligência artificial, algoritmo genético.

## I. INTRODUÇÃO

Uma das causas da redução da energia disponível para consumo, são as perdas técnicas constantemente dissipadas no sistema de distribuição, decorrentes das resistências elétricas nos equipamentos e linhas. Como referência verifica-se na literatura científica valores para as perdas técnicas de 2% na transmissão e 5% na distribuição[1]. No Brasil, encontra-se com frequência perdas técnicas nas redes de distribuição muito acima desses valores; caracterizando a possibilidade promissora de conservação da energia, assim como do aumento do faturamento, por meio da redução de perdas. Por exemplo, considerando o empenho de redução das perdas técnicas que levem ao acréscimo de 2% da energia total distribuída, aproximadamente 300.000 GWh [23], é equivalente a uma injeção de energia de 1.000MW no sistema de distribuição.

Este trabalho foi realizado com apoio da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), FAPESP, CNPq e CAPES. Os autores esclarecem que o apoio das instituições mencionadas não significa que elas necessariamente endossam as idéias apresentadas; elas são de exclusiva responsabilidade dos autores

L. R. Manhaes – Companhia Paulista de Força e Luz (e-mail: rene@cpfl.com.br).

C. Cavellucci – THOTH Consultoria (e-mail: thoth\_celso@mpc.com.br).

C. Lyra Filho – Universidade Estadual de Campinas (email: chrlyra@densis.fee.unicamp.br)

C. P. Fernandes – Universidade Estadual de Campinas (email: fernandes@densis.fee.unicamp.br)

P. M. FRANCA Fernandes – Universidade Estadual de Campinas (email: franca@densis.fee.unicamp.br)

A redução das perdas em redes de distribuição de energia elétrica pode ser obtida por meio de três linhas de atuação: substituição de linhas e equipamentos (usando-se materiais de menores resistências ou modificando-se níveis de tensão), modificações na carga (através de iniciativas de atuação nas demanda ou instalação de capacitores) e reconfiguração das redes. Em horizontes acima de três anos, todas elas devem ser exploradas para obtenção dos melhores benefícios. Em prazos mais curtos, reconfigurações e instalações de capacitores são as alternativas mais atraentes.

Este trabalho descreve resultados obtidos de redução de perdas por meio de reconfiguração da rede, instalação de capacitores e uma abordagem coordenada da reconfiguração associada a instalação de capacitores.

## II. ABORDAGEM UNIFICADA

A Figura apresenta a estratégia de coordenação proposta para a abordagem unificada de instalação de capacitores e reconfiguração de redes.



FIGURA 1 - Estratégia de coordenação

A etapa de obtenção da melhor configuração radial por “Busca Heurística Modular” (BHM) faz uma busca larga no espaço de soluções, encontrando a configuração de rede de perdas mínimas. Nessa busca, utiliza-se a “hipótese simplificadoradora” de que as redes são razoavelmente bem

compensadas – no sentido de que a relação entre cargas ativas e reativas é aproximadamente constante ao longo da rede. Definida a configuração de rede, a “Instalação Otimizada de Capacitores” (PLDC) procura localizar e dimensionar capacitores de forma a promover a melhor compensação possível de reativos para esta configuração – nas versões mais recentes do programa, a capacidade de compensação pode estar limitada por orçamento. O “Ajuste Fino” por troca de ramos melhora a solução encontrada pelo PLDC através de busca em sua vizinhança. Nessa busca local, o “Ajuste Fino” considera os reativos de forma explícita; eventuais desequilíbrios na relação entre cargas ativas e reativas podem levar a novas configurações, mais adequadas a essa situação. Realizada a busca local, o laço faz a realimentação entre as duas últimas etapas, procurando melhorar sucessivamente as instalações de capacitores e configurações de redes – o processo é interrompido quando ambos indicam a mesma solução em iterações sucessivas.

As seções seguintes apresentam os procedimentos desenvolvidos para a Reconfiguração da Rede – BHM e “Ajuste Fino” – e para a Instalação de Capacitores.

### III. RECONFIGURAÇÃO DA REDE

A figura 1 ilustra uma rede de distribuição representada pelo seu diagrama unifilar.

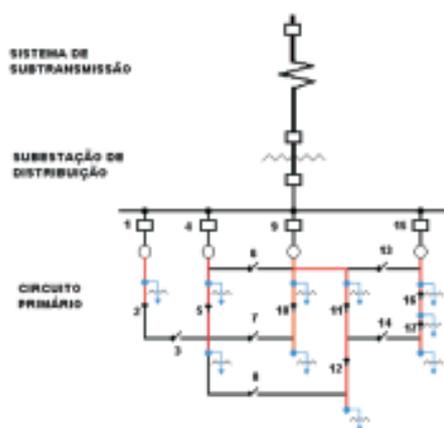


FIGURA 2 - Diagrama unifilar do sistema de distribuição.

A configuração do sistema de distribuição pode ser alterada, mudando-se o estado das chaves, por ação local (das equipes de manutenção) ou remota (pelo sistema de automação). A figura 3 ilustra a mudança de configuração da rede da figura 1, quando são fechadas as chaves de número 5, 10 e 11 e abertas as chaves de números 3, 7 e 14.

O número de configurações possíveis cresce exponencialmente com a dimensão da rede. Por exemplo, para a rede com seis chaves (duas abertas e 4 fechadas) desenhada na figura 4 existem 11 configurações diferentes.

O uso de procedimentos de reconfiguração de redes para redução de perdas na distribuição de energia elétrica foi proposto pelos engenheiros A. Merlin e H. Back, da “Electricité de France (EDF)”, em trabalho apresentado na “5th Power System Computation Conference” [3]. Além de identificarem a possibilidade de reduzir perdas em sistemas de distribuição através de um uso mais amplo das possibilidades de chaveamentos, esses autores apresentaram uma formulação matemática rigorosa para o problema e desenvolveram duas abordagens de solução.

A primeira das abordagens propostas por Merlin-Back, normalmente denominada *abertura seqüencial de chaves*, utiliza conceitos de otimização e uma heurística construtiva. A segunda, procura encontrar uma configuração de mínimas perdas através do método “branch-and-bound” para otimização com variáveis inteiras - sabe-se hoje, com subsídios da teoria de complexidade computacional [3], que esse método é aplicável apenas em redes de pequeno porte.

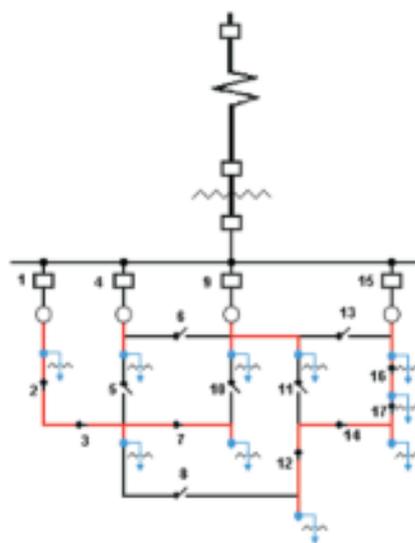


FIGURA 3. Configuração alterada da rede

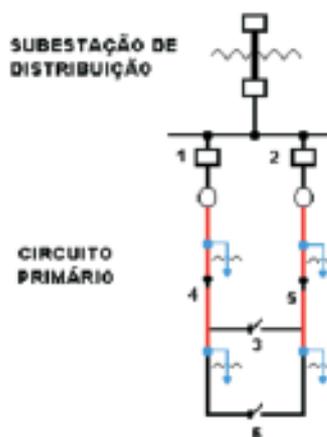


FIGURA 4. Rede de distribuição com possibilidade de 11 configurações diferentes.

Aplicando suas idéias a um conjunto de redes, Merlin e Back observaram, em acréscimo aos benefícios diretos com redução de perdas, outros aspectos positivos: obtenção de uma boa distribuição de cargas entre os alimentadores; aumento do período em que as redes permanecem usáveis, sem necessidade de investimentos em expansão; maior robustez em relação a falhas em estudos de contingências houve redução no número de operações de chaves para restabelecimento do suprimento de energia a áreas escuras.

Resultados tão promissores impulsionaram as pesquisas nos anos que se sucederam a publicação do trabalho de Merlin e Back, divulgadas em mais de 50 artigos publicados nas revistas científicas da área. Uma revisão da bibliografia para redução de perdas pode ser encontrada em trabalho elaborado por Lyra, Pissara e Cavellucci [5].

### A. Formulação do Problema

Um modelo de grafo [1] pode ser utilizada para representar as entidades da rede de distribuição [5]. Grafos são objetos matemáticos que compreendem os conjuntos de nós (N) e arcos (A). Quando um grafo  $G = [N, A]$  representa uma rede de distribuição, os nós no conjunto N correspondem aos barras de carga e subestações – o nó raiz (R) é incluído no conjunto N para evitar dificuldades desnecessárias no tratamento da conectividade da rede. Os arcos no conjunto A representam as linhas e as chaves – os arcos ligando as subestações ao nó raiz identificam a rede de distribuição em 138kV. A figura 5 mostra um modelo de grafo para redes de distribuição.

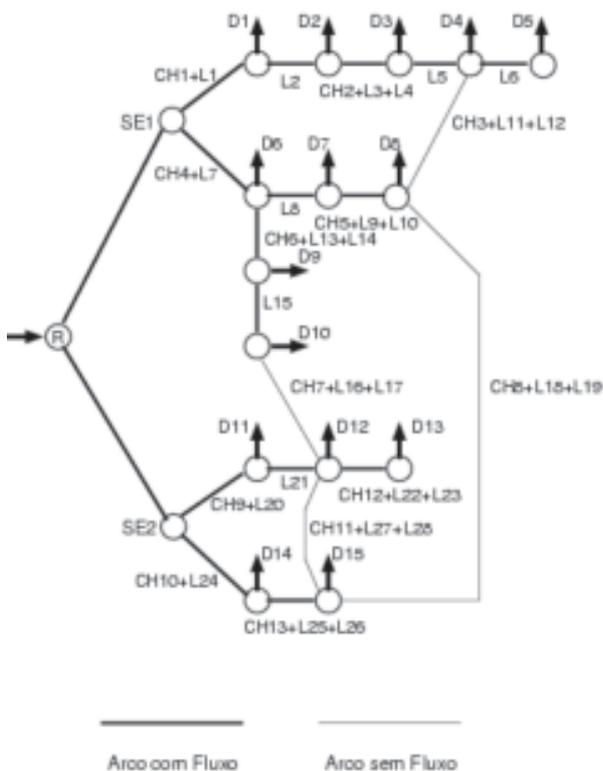


FIGURA 5 - Modelo de grafo para redes de distribuição de energia elétrica.

Utilizando-se o modelo de grafos, o problema de minimização de perdas pode ser formalmente caracterizado como  $P_1$  [2][17].

$$\text{Min} \quad \sum_{k \in N} \sum_{i \in A_i} r_{ki} \frac{P_{ki}^2 + Q_{ki}^2}{V_k^2} \quad (1)$$

$$\text{s.a.} \quad P_k = \sum_{i \in A_i} P_{ki} + P_{Lk} \quad (2)$$

$$Q_k = \sum_{i \in A_i} Q_{ki} + Q_{Lk} \quad (3)$$

$$V_{ki}^2 = V_k^2 - 2(r_{ki}P_{ki} + y_{ki}Q_{ki}) \quad (4)$$

$$G' = [N, A'] \text{ é uma árvore} \quad (5)$$

onde  $A_k$  é o conjunto de arcos com origem no nó  $k$ ,  $P_k$  é o fluxo de potência ativa no arco  $k$ ,  $Q_k$  é o fluxo de potência reativa no arco  $k$  e  $V_k$  é a tensão no nó  $k$ ;  $r_{ki}$  e  $y_{ki}$  representam, respectivamente, as resistências e reatâncias das linhas agregadas ao arco  $k$  (ou seja, à chave  $ki$ );  $A'$  é o conjunto de arcos correspondentes a chaves fechadas.

A solução do problema deve respeitar os limites nas tensões. Restrições de capacidade das linhas, chaves e demais componentes da rede precisam também ser observadas.

Supondo-se que a rede de distribuição é adequadamente compensada e lembrando-se que  $V_k^2 \approx 1$ , o problema para encontrar a configuração de perdas mínimas pode ser simplificado na forma  $P_2$  a seguir [17].

$$\text{Min} \quad \sum_{a_k \in A} r_k x_k^2 \quad (6)$$

$$\text{s.a.} \quad \mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (7)$$

$$\underline{\mathbf{x}} \leq \mathbf{x} \leq \bar{\mathbf{x}} \quad (8)$$

$$G' = [N, A'] \text{ é uma árvore} \quad (9)$$

onde  $x_k$  é o fluxo de potência ativa (ou corrente) no arco  $a_k$ ,  $r_k$  corresponde as resistências das linhas agregadas na chave  $k$ ,  $\mathbf{A}$  é a matriz de incidência nó-arco associada ao grafo  $G$ ,  $\mathbf{x}$  é o vetor de fluxos,  $\mathbf{b}$  é o vetor cujas componentes representam demandas ou a injeção de potência no nó raiz (por conveniência, atribui-se uma injeção de forma que  $\sum_{i \in N} b_i = 0$ ). Cada linha da matriz  $\mathbf{A}$  corresponde ao balanço de potências em um determinado nó do grafo que representa a rede de distribuição. Limites para os fluxos através das chaves são caracterizados pelos vetores  $\underline{\mathbf{x}}$  e  $\bar{\mathbf{x}}$ .

Como consequência da radialidade da rede, a solução do problema  $P_2$  é uma árvore geradora de custo mínimo para a rede de distribuição. No entanto, ao contrário do problema clássico de árvores geradoras de custo mínimo [1], os custos associados aos arcos ( $r_k x_k^2$ ) variam quando mudam as configurações da rede (isto é, quando mudam as árvores  $G'$ ). Esta propriedade coloca o problema no con-

junto de problemas combinatórios de solução muito difícil, onde o esforço de cálculo cresce exponencialmente com a dimensão do problema. Não por acaso, as abordagens bem sucedidas de solução para redes grandes são baseadas em heurísticas, onde se abandona a pretensão de garantir a obtenção de soluções ótimas globais, contentando-se com melhoras significativas no total de perdas. Ironicamente, o problema clássico de árvores geradoras de custo mínimo pode ser resolvido por algoritmos “gulosos”, a mais simples das abordagens para problemas de otimização [1].

As abordagens mais usadas em procedimentos de redução das perdas por reconfiguração da rede são *Abertura Seqüencial* e *Troca de Ramos*.

Os procedimentos de abertura seqüencial de chaves, também chamados *procedimentos em duas etapas* derivam do método aproximado proposto por Merlin e Back [10]; normalmente são considerados como uma “mistura” de otimização e heurística [11].

O método troca de ramos (*branch-exchange*), proposto por Cinvanlar [4], é provavelmente a alternativa mais utilizada para reduzir perdas em sistemas de distribuição. O procedimento tem início com uma configuração de operação radial. Para cada chave aberta, onde haja diferença de tensões significativas entre seus terminais, identifica o anel que se formará na rede se essa chave for fechada. Percorrendo este anel, a partir do terminal de maior diferença de potencial, procura uma chave que, quando aberta, proporcione a maior redução de perdas (em relação a configuração atual). Se existir tal chave, realiza o fechamento da primeira e a abertura da segunda chave (realiza uma “troca de ramos”). As perdas resistivas são reduzidas sem perder a estrutura radial do sistema. Esse procedimento continua até que não seja mais possível melhorar a solução (ou que os ganhos sejam insignificantes).

Cavellucci e Lyra [5] unindo as técnicas de otimização não linear em grafos e métodos de buscas informadas (amadurecidas em pesquisas na área de inteligência artificial), configurações radiais que minimizem as perdas em redes de distribuição podem ser encontradas por meio de busca no *espaço de estados*, onde cada *estado* (também chamado de *nó* do grafo de busca) é caracterizado por uma configuração de rede com distribuição ótima dos fluxos. A busca é iniciada no *estado inicial*, identificado com a solução para o problema  $P_2$  relaxando a restrição (4). A solução obtida normalmente equivale a uma configuração de rede em anéis com todas as chaves fechadas. Estados sucessores são gerados pela abertura de chaves e um novo problema  $P_2$  relaxado é resolvido. O *objetivo* da busca é encontrar a configuração da rede que resolve o problema  $P_2$ .

A busca utiliza conhecimento de três modos. Primeiro, usa-se uma função heurística construída a partir das soluções ótimas do problema relaxado  $P_r$ . Segundo, utiliza uma solução factível de referência com o melhor valor para as perdas obtido até um dado ponto do procedimento de busca para permitir a *poda por dominância* [11]. Final-

mente, informações adicionais foram incluídas na estratégia de busca adotando uma função de avaliação heurística,  $f_h(n)$ , que permitiu antecipar a *poda por dominância*.

A função heurística foi definida como,  $f_h(n) = g(n) + h(n)$ , onde  $g(n)$  é o aumento das perdas do nó inicial ao nó  $n$  e  $h(n)$  é uma estimativa das perdas do nó  $n$  ao nó objetivo. A função  $h(n)$  foi definida como, onde  $c(n)$  é o número de anéis existente na configuração representada pelo nó  $n$  e é uma estimativa do aumento médio das perdas a cada anel aberto, no caminho do nó  $n$  até o nó objetivo.

A busca informada quando explora um nó da árvore de busca ela considera todas as possibilidades de abertura de chaves. Muitas delas levariam a caminhos que posteriormente seriam podados.

Fernandes [22] desenvolveu uma metodologia para a resolução do problema de redução das perdas em sistemas de distribuição reais de grande porte. Ela é baseada num método de duas fases. A primeira realiza uma sondagem ampla no espaço de soluções, utilizando idéias dos procedimentos de busca informadas de Cavellucci e Lyra [5], esta fase denomina-se *busca heurística modular* (BHM).

A busca heurística modular armazena apenas um “conjunto promissor” de chaves. Em cada nó, o “conjunto promissor” de chaves corresponde a um subconjunto de chaves que podem ser abertas no nó em exploração; é caracterizado por um número  $p$  de chaves, por onde passam o menor fluxo. Quando o valor de  $p$  for igual a um, o método será idêntico ao de *abertura seqüencial de chaves* [10]; quando  $p$  corresponde a todas as possibilidades de abertura de anéis, a *busca heurística modular* coincide com *busca backtracking heurística* [5]. Após a obtenção da melhor solução obtida pela *busca heurística modular* faz-se um ajuste fino da solução usando procedimento *troca de ramos*.

#### IV. INSTALAÇÃO DE CAPACITORES

Capacitores são fontes de energia reativa. O objetivo de sua aplicação em sistemas de potência é a compensação de energias reativas produzidas por cargas indutivas ou reatâncias das linhas. Quando adequadamente utilizados, permitem a obtenção de um conjunto de benefícios correlatos que incluem a redução das perdas e do consequente aumento do faturamento da empresa.

Antes da década de 50 os capacitores eram instalados nas subestações, no início dos circuitos primários de alimentação. Posteriormente, constatou-se a vantagem de instalá-los próximos às cargas. Com o aparecimento de bancos capacitores de menor porte, que podiam ser instalados nos postes da rede de distribuição, o problema de encontrar sua melhor localização e a capacidade adequada tornou-se mais complexo.

## A. Formulação do Problema

O problema de instalação de capacitores em uma rede de distribuição caracteriza-se pela sua localização e dimensionamento (PLDC). A solução deste problema define o número, tipo e tamanho dos capacitores a serem instalados nos circuitos primários da rede, de forma que o custo total de instalação e operação do sistema seja o menor possível.

O PLDC é um problema de otimização combinatória que busca minimizar o custo total de instalação dos bancos capacitores e as perdas na rede, CT, dado por:

$$CT = \sum_{n=1}^N x(n)C(j) + \sum_{k=1}^K ceT(k)PC(k) \left( \sum_{m=1}^{NT} R(m)I(m)^2 \right)$$

onde N é número de locais candidatos (seções de alimentador) a receber capacitores, K o número de níveis de carga, J o número de diferentes tamanhos disponíveis de capacitor, NT o número de trechos da rede,  $N_{\text{nós}}$  o número de nós da rede, C(j) o custo do capacitor de tamanho j (para  $j = 1 \dots J$ ), ce o custo unitário de energia, PC(k) a porcentagem de carga no nível k (para  $k = 1 \dots K$ ), T(k) duração da carga de nível k (para  $k = 1 \dots K$ ), V(i) a tensão no nó i da rede (para  $i = 1 \dots N_{\text{nós}}$ ), I(m) corrente no trecho de rede m (para  $m = 1 \dots M$ ), R(m) a resistência no trecho m (para  $m = 1 \dots M$ ) e x(m) a variável binária que determina se o local candidato n vai receber capacitores ( $x(n) = 1$ ) ou não ( $x(n) = 0$ ).

Toda solução deve satisfazer as restrições de fluxos nos trechos de redes e de tensões máximas e mínimas nos nós i (para  $i = 1 \dots N_{\text{nós}}$ ). Assim como, o número máximo de capacitores a serem instalados (restrição operacional determinada pela equipe de manutenção da empresa), o orçamento máximo disponível anual para instalação de bancos capacitores (restrição imposta pelo departamento de finanças da empresa) e o prazo de amortização do investimento.

## B. Abordagem por Algoritmo Memético

Algoritmos Meméticos (AM), como os Algoritmos Genéticos (AG), baseiam-se em processos naturais relacionados com o princípio da evolução de espécies vivas, tais como recombinação, seleção e mutação, entre outros. O princípio

básico consiste em selecionar para reprodução bons indivíduos, identificados aqui como boas soluções para o problema de otimização combinatória, e recombiná-los com o propósito de se obterem soluções melhores que os pais. Esses filhos, por sua vez, tendem a ocupar o lugar dos indivíduos menos adaptados da população, melhorando a adaptabilidade da população como um todo. A mutação entra como um elemento adicionador de variedade genética. Todos esses elementos agindo sobre uma dada população levarão a um processo evolutivo; uma população inicialmente pouco adaptada, ao fim de um certo número de gerações, constituir-se-á na sua maioria de indivíduos bem adaptados.

Algoritmos Meméticos utilizam ainda o conceito de “evolução cultural”, onde a adaptabilidade de um indivíduo pode ser modificada no decorrer de sua existência no

meio da população. Um indivíduo pode ser geneticamente pouco favorecido ao nascer, mas devido às condições em que vive, por trocas de informação com outros indivíduos e experiências pessoais, entre outros aspectos, pode tornar-se mais adaptado; mais do que isso, pode transmitir essa experiência aos seus descendentes (evolução cultural). A seguir tem-se um pseudo-código simplificado de um AM, ressaltando que o passo 5 deferência um AM.

### Algoritmo Memético

1. Cria a população inicial.
2. Seleciona indivíduos para recombinação
3. Recombina os indivíduos selecionados, gerando descendentes mediante cruzamento.
4. Aplica mutação aos descendentes.
5. Otimiza os descendentes mediante uma busca local.
6. Insere os descendentes na população, eliminando os indivíduos menos adaptados. Volta ao passo 2.

## C. Representação Genética

A representação escolhida para o PLDC é bem intuitiva e clássica, com uma configuração de capacitores sendo representada por um cromossomo, cujos alelos assumem valores binários. A primeira parte do cromossomo codifica os locais candidatos (seções de alimentadores) que serão usados para possível instalação dos capacitores. Se o alelo correspondente a posição  $i$  tem valor 1, isso significa que deverá ser instalado um capacitor no local  $i$ ; caso contrário o local não receberá capacitores. Observa-se que a dimensão dessa seqüência de caracteres é  $N$  (utiliza-se freqüentemente o anglicismo *string* para a seqüência de caracteres). A segunda parte do cromossomo codifica o valor em kVAr da capacidade dos capacitores instalados. Na Figura 6 representa-se um exemplo de uma solução para o problema com seis locais candidatos no alimentador.

Analisando a Figura 6 e a Tabela 1, as barras 2, 3 e 6 estão recebendo capacitores de capacidade 900, 300 e 600 kVAr, respectivamente. As outras barras permanecem sem capacitores, pois seus alelos correspondentes na 1a parte do cromossomo assumem valor 0. Nestes casos, os valores de kVAr da 2a parte do cromossomo são ignorados quando se calcula a função as perdas elétricas correspondentes à essa solução.

[ 0 1 1 0 0 1 / 3 5 2 1 2 4 ]

locais      capacidade dos  
capacitores

FIGURA 6. Codificação de um cromossomo

TABELA 1.  
DADOS DOS CAPACITORES UTILIZADOS

Índice	Capacidade em kVAr
1	150
2	300
3	450
4	600
5	900
6	1200

## V. ESTUDOS DE CASOS

Os estudos de casos realizados foram baseados em redes de grande porte. As principais características das redes utilizadas estão resumidas na Tabela 2.

**TABELA 2**  
**CARACTERÍSTICAS DAS REDES UTILIZADAS**

Rede	Nº de Nós	Nº de Chaves	Nº de Chaves Abertas
A	1.528	1.558	30
B	2.274	2.316	43
C	6.860	7.063	199

Nestes estudos de casos considerou-se apenas manobra em chaves á óleo, o valor da energia de R\$ 200,00 por MWh, fator de carga 0,6, taxa de juros 12% a.a. e 5 anos para amortização do orçamento utilizado na instalação dos capacitores. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 3.

Resultados detalhados para os estudos de casos podem ser verificados nos relatórios técnicos R4-Aditivo01 [15] e R5-Aditivo1 [16].

Nos estudos de casos realizados pode-se verificar que:

1. A redução de perdas aumentou proporcionalmente ao crescimento no custo de energia. Este resultado vem no sentido de comprovar a coerência da metodologia; custos de energia mais altos viabilizam a instalação de um maior número de capacitores, abrindo melhores possibilidades para redução de perdas.
2. O aumento no orçamento disponível para aquisição de capacitores levou a reduções crescentes nas perdas (os benefícios obtidos por reconfigurações das redes independem do orçamento). Naturalmente, este resultado é esperado e apenas reforça a coerência da metodologia; com orçamentos mais altos, ampliam-se as possibilidades de boas instalação de capacitores.
3. Os lucros líquidos anuais cresceram com a disponibilidade de orçamento (o custo de instalação de um maior número de capacitores é compensado pela redução adicional de perdas).

## VI. CONCLUSÕES

Este trabalho descreveu uma metodologia para redução de perdas em redes de distribuição de energia elétrica, abordando de forma unificada ações de reconfigurações com a instalação de capacitores (dimensionamento e localização de capacitores), promovendo avanços no estado do conhecimento registrado na literatura técnica internacional [9][12][13][8][6]. O requisito de produzir resultados aplicáveis em redes reais da CPFL (incluindo as de grande porte) foi outro aspecto importante no balizamento das pesquisas.

**TABELA 3**  
**RESULTADOS OBTIDOS PARA AS REDES A, B E C**

	Rede A	Rede B	Rede C
Limitação do Orçamento (R\$)	1.500	3.500	4000
Perdas Iniciais (kW)	181	699	814
Perdas finais (kW)	155	634	776,28
Custo das Perdas (R\$)	272.295	1.110.434	1.425.454
Custo dos Capacitores (R\$)	1.213	3.506	3.989
Número de Capacitores (Capacidade-KVAr) 1(600)	3(1650)	4(600)	
Lucro Líquido (R\$)	5.341	47.401	35.544

As contribuições inovadoras do projeto podem ser agrupadas em dois conjuntos: estratégias de coordenação e a localização e dimensionamento de capacitores.

O requisito de desenvolver metodologia aplicável a redes grandes da CPFL levou ao desenvolvimento de duas técnicas complementares: a primeira, mais rápida, é uma nova abordagem por algoritmos genéticos (AG), baseada em núcleos de populações com estrutura hierárquica; a segunda, mais detalhada, agrega um conjunto de buscas locais que caracterizam a classe de algoritmos meméticos (AM). Pode-se destacar alguns aspectos inovadores no desenvolvimento das técnicas: a utilização de populações com estrutura hierárquica; a construção de um conjunto de buscas locais que caracterizam a classe de algoritmos meméticos; os níveis de refinamento e articulação das buscas locais, elaborados a partir das especificidades do problema e subsidiados por análises conceituais das informações obtidas nos resultados experimentais.

Atualmente a CPFL utiliza o reconfigurador (BHM e “Ajuste Fino”) para estudos de configuração da rede de distribuição. O programa otimizador esta integrado ao programa de planejamento do sistema elétrico chamado REDE [20]. Os resultados obtidos são bastante significativos, indicando o próximo passo que é a utilização do otimizador para a instalação de capacitores.

A continuação deste trabalho envolve o controle de capacitores variáveis (projeto de P&D em desenvolvimento para a CPFL-Piratininga ciclo 2002-2003) e considerar na reconfiguração da rede a variação da demanda durante um período de tempo [17][19].

## VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### PERIÓDICOS:

- [1] Ahuja, R., Magnanti, T. e Orlin, J. "Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications. Prentice Hall, Englewood Cliffs. 1993.
- [2] Baran, M. E.; Wu, F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. IEEE. Transactions on Power Delivery **4**(2):1401-1407. 1989.
- [3] Buch, J. B. Miller, R. D. e Weeler, J. E. "Distribution system integrated voltage and reactive power control" IEEE Transaction on Power Apparatus and System PAS-101:284-289, 1982.
- [4] Civanlar, S., Grainger, J., Yin, H. e Lee, S. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. IEEE Transactions on Power Delivery **3**(3): 1217-1223. 1988.
- [5] Cavellucci, C. Lyra, C. Minimization of energy losses in electric power distribution system by intelligence search strategies. International Transactions in Operational Research, **4**(1): 23-33.1997.
- [6] El-Said, M. E. A new approach for optimal coordination of feeders reconfiguration and capacitor control in distribution networks. Proceedings of the Universities Power Engineering Conference, Vol. 1, pp. 272-278, 1997.
- [7] Garey, M. S. e Johnson, D. S. "Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness". W. H. Freeman, New York. 1979.
- [8] Jiang, D. e Baldik, R. Optimal electric distribution system switch reconfiguration and capacitor control. IEEE Transactions on Power Systems, **11**(2):890-897, 1996.
- [9] Lee, R. E. e Brooks, C. L. A method and its applications to avaluate automated distribution control. IEEE Transactions on Power Delivery, **3**(3):1232-1240, 1988.
- [10] Merlin, A. e Back, H. Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in a urban power distribution system. Proceedings of the 5<sup>th</sup> Power System Computation Conference (PSCC), paper 1.2/6, Vol. 1, PSCC, Cambridge, UK, pp.1-18. 1975.
- [11] Pearl, J. "HEURISTICS: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving". Addison-Wesley, Reading. 1984.
- [12] Peponis, G. J.; Papadopoulos, M. e Hatzargyriou, N. Distribution network reconfiguration to minimize resistive line losses. IEEE Transactions on Power Delivery, **10**(3):1338-1342, 1995.
- [13] Peponis, G. J.; Papadopoulos, M. e Hatzargyriou, N. Optimal operation of distribution network. IEEE Transactions on Power Systems, **11**(1):59-67, 1996.
- [14] Sarfi, R. J., Salama, M. M. A. e Chikhani, A. Y. A survey of the state of art in distribution system reconfiguration for system loss reduction. Electric Power System Research, Vol. 31

### RELATÓRIOS TÉCNICOS:

- [15] Mendes, A. ; Cavellucci, C.; Lyra Filho, C.; Pissara, C.; França, P. M. Abordagem Unificada da Instalação de Capacitores e Reconfiguração com o Objetivo de Redução de Perdas – Estudos de Casos. Relatório Técnico R4-Aditivo01, agosto de 2001.
- [16] Mendes, A. ; Cavellucci, C.; Lyra Filho, C.; Pissara, C.; França, P. M. Abordagem Unificada da Instalação de Capacitores e Reconfiguração com o Objetivo de Redução de Perdas – Elaboração da Metodologia. Relatório Técnico R5-Aditivo01, outubro de 2001.

### ARTIGOS EM ANAIS DE CONFERÊNCIAS (PUBLICADOS):

- [17] Bueno, E. A. e Lyra, C. Contribuição ao estudo de redução de perdas por reconfigurações em sistemas de distribuição de energia elétrica com demandas variáveis, in SBA (ed), Vol 1, Sociedade Brasileira de Automática, pp x1-x6. Natal. 2002.
- [18] Lyra, C., Pissarra, C. M. A. e Cavellucci, C. Redução de perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica, in A. H. Bruciapaglia e A. J. S. Costa (eds), *Anais do XIII Congresso Brasileiro de Automática*, Vol. 1, Sociedade Brasileira de Automática , pp. 998-1003. Florianópolis, 2000.
- [19] Bueno, E. A. e Lyra Filho, C. O Impacto das Variações das Cargas ao Longo de um dia sobre as Perdas em Sistemas de Distribuição. XV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica \_ SENDI 2002.
- [20] Manhães, L. R. ; Lyra Filho, C.; Fernandes, C. P. e Cavellucci, C. Reconfiguração da Rede para Redução das Perdas Técnicas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. XV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica \_ SENDI 2002.

### DISSERTAÇÕES E TESES:

- [21] Cavellucci, C. "Buscas Informadas Baseadas em Grafo para Minimização das Perdas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica". Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP, Campinas, São Paulo. 1998.
- [22] Fernandes, C. M. A. P. Redução das Perdas Técnicas em Redes de Distribuição de Energia Elétrica. Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP, Campinas, São Paulo. 2003.

### SITES

- [23] [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br), 25/07/2003 11:00.