

Reconfiguração de Redes para Redução das Perdas Técnicas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Luís René Manhães – CPFL Christiano Lyra Filho – UNICAMP, Cristiane Pissarra Fernandes – UNICAMP e Celso Cavellucci – THOTH Consultoria

E-mail: rene@cpfl.com.br

Palavras-chave – Métodos de Busca; Minimização de Perdas; Problemas de Otimização; Sistema de Distribuição; Sistema de Potência.

Resumo - O objetivo deste trabalho é apresentar uma nova metodologia aplicada a redução das perdas técnicas através da reconfiguração de redes. A identificação das alternativas de abertura e fechamento dispositivos seccionadores da rede, para encontrar a configuração da rede radial de menores perdas, pertence à classe de problemas considerados muito difíceis, cujo esforço computacional cresce exponencialmente com o número de dispositivos seccionadores instalados na rede. A técnica utilizada na resolução desse problema considera conceitos de inteligência artificial, associados a métodos de otimização de funções não lineares de fluxos em rede e heurísticas de otimização local. Um ambiente computacional gráfico é utilizado para editar e executar o programa otimizador para obter a configuração de rede com redução das perdas. Os resultados da otimização são transferidos para a interface gráfica, permitindo aos engenheiros de planejamento a visualização e análise dos resultados.

1. INTRODUÇÃO

As perdas técnicas, decorrentes das resistências elétricas das linhas e equipamentos, são continuamente dissipadas, diminuindo a energia elétrica disponível para consumo nos sistemas de transmissão e distribuição. Valores de referência na literatura científica da área indicam 2% de perdas técnicas na transmissão e 5% na distribuição [4]. No Brasil, encontra-se com frequência perdas técnicas nas redes de distribuição muito acima desses valores [5]; existindo um espaço promissor para ganhos de energia por redução de perdas.

Três linhas de atuação podem proporcionar reduções de perdas em redes de distribuição de energia elétrica: 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 concentra-se na primeira alternativa.

A redução de perdas por reconfigurações de redes é obtida por identificação de alternativas de abertura e

fechamento de chaves que levem a caminhos de menores resistências para atendimento de um determinado perfil de demandas. Fácil dizer, difícil fazer; o problema de encontrar a configuração de perdas mínimas pertence à classe dos problemas considerados muito difíceis, onde o esforço de cálculo está associado ao número de combinações de estados das chaves das redes, fator que cresce exponencialmente com o número de chaves. Este trabalho apresenta uma nova alternativa para abordagem do problema, baseada em conceitos de buscas informadas em grafos, com explorações globais e locais do espaço de soluções, podendo ser considerada como uma exploração na "perspectiva Zoom" [10].

A perspectiva *zoom* foi integrada a um programa computacional com interface gráfica utilizado pela CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz) para auxiliar no planejamento de redes de distribuição. Essa integração acrescentou ao ambiente gráfico uma ferramenta de otimização de fácil utilização no estudo de configurações de redes. Neste trabalho descreve-se a integração das funções para otimização das perdas ao programa denominado REDE e os resultados obtidos utilizando redes reais da CPFL.

2. MERLIN-BACK E SUCESSORES

O uso de procedimentos de reconfigurações de redes para redução de perdas na distribuição de energia elétrica foi proposto inicialmente pelos engenheiros A. Merlin e H. Back, da "Electricité de France (EDF)", em trabalho apresentado na "5th Power System Computation Conference" [11]. 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 sequencial 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 [8], que esse método é aplicável apenas em redes de pequeno porte.

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. Procurou-se elaborar novos métodos exatos (normalmente aplicados apenas em exemplos ilustrativos de tamanho muito pequeno), desenvolver alternativas de métodos aproximados (aplicáveis a redes de maior porte ou incorporando outros aspectos de representação) e estudar a aplicação de novos paradigmas para solução de problemas (computação evolutiva e redes neurais, por exemplo). Uma revisão da bibliografia para redução de perdas pode ser encontrada em trabalho elaborado pro Lyra et al.[9].

Aqui, gostaríamos apenas de destacar as heurísticas *abertura seqüencial de chaves* [11][14] e *troca de ramos* [1][7], as abordagens mais usadas em procedimentos de redução de perdas. Ressalta-se também o procedimento de *busca informada* proposto por Cavellucci e Lyra [6], as idéias discutidas esteiam a perspectiva “zoom” apresentada neste trabalho.

3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Um diagrama simplificado de rede de distribuição é apresentado na Figura 1. As principais entidades de uma rede de distribuição, do ponto de vista de estratégias de reconfiguração para minimização de perdas, são chaves (CH1, CH2, ... , CH13), linhas (L1, L2, ... , L28), cargas (D1, D2, ... , D15) e subestações (SE1, SE2). Pode-se adotar um modelo de *grafos* para representar essas entidades e suas relações [1][6]. A representação por grafos tem a dupla vantagem, de ser muito intuitiva e contribuir para o desenvolvimento de algoritmos de otimização e de visualização eficientes.

Grafos G são entidades matemáticas caracterizadas por um conjunto de *nós* N e relações entre esses nós, denominadas *arcos* A . Quando um grafo $G = [N, A]$ representa uma rede de distribuição, os *nós* N correspondem a barras de carga ou subestações - um *nó raiz* (R) é também incluído no grafo, para evitar dificuldades desnecessárias no tratamento da conectividade da rede. *Arcos* no conjunto A representam linhas ou chaves (os arcos associados a chaves incluem as linhas de acesso às mesmas); os arcos que conectam o nó raiz à subestações podem ser identificados com as linhas de transmissão (perdas nesses arcos não são consideradas no problema de minimização de perdas na distribuição). A Figura 2 ilustra o grafo associado à rede de distribuição representada na Figura 1

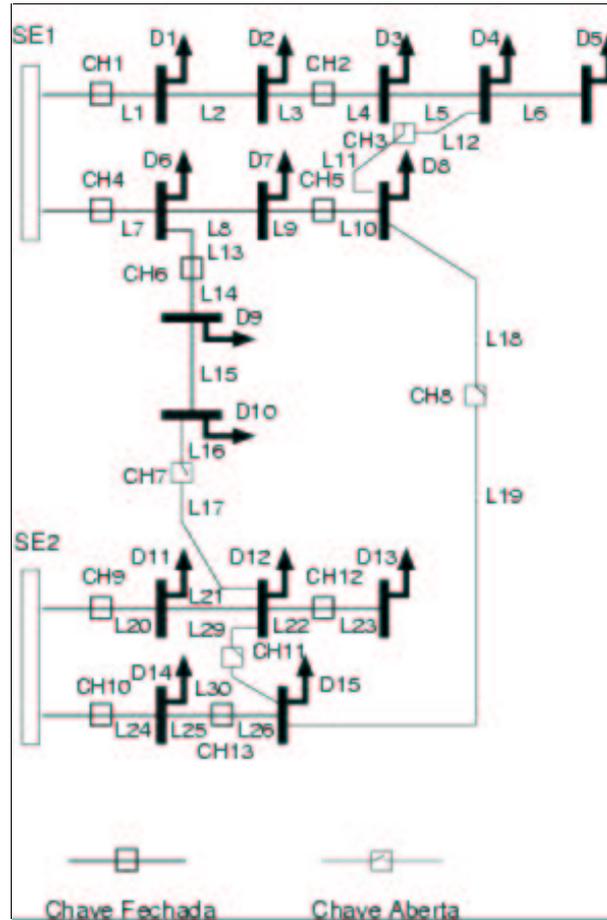


FIGURA 1. REPRESENTAÇÃO DE GRAFO PARA UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

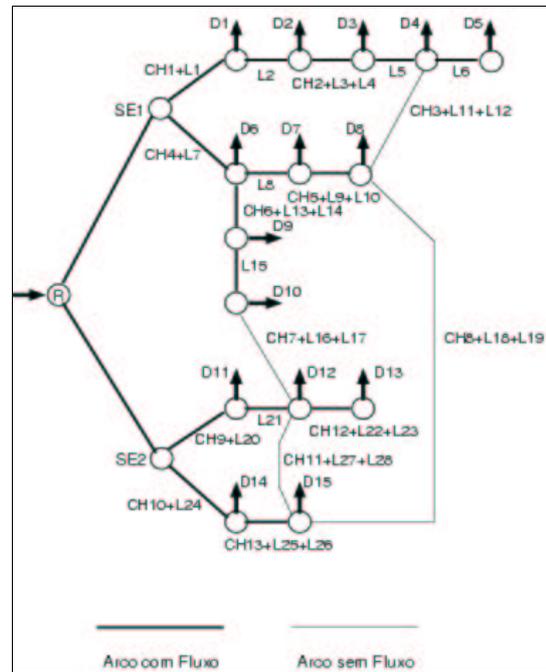
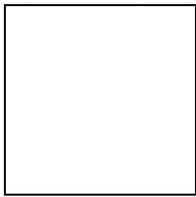
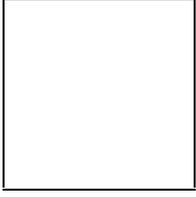
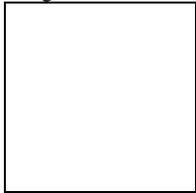


FIGURA 2. MODELO DE GRAFO PARA UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

Em redes de distribuição que operam radialmente existe um único caminho energizado ligando cada nó à raiz. Usando a nomenclatura de grafos, a rede energizada (ou seja, em operação) deve ser uma *árvore geradora*



do grafo  - isto é, um subgrafo conexo e sem ciclos que contém todos os nós de

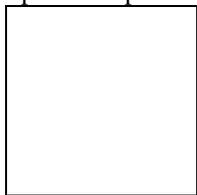


 [1]. Quando o contexto não deixar margem para confusão, abreviaremos *árvores geradoras* por *árvores*.

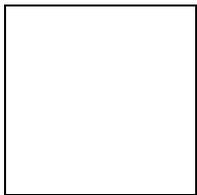
Uma simplificação muito adotada é a representação de trechos de linhas compreendidas entre duas chaves por um único arco, associado a uma das chaves [3] [6] [7]. Esta hipótese simplificadora é adotada na exposição a seguir, mas apenas como recurso para simplificar a exposição das idéias – os estudos de casos discutidos na Seção 7. consideram as redes com o detalhamento representado na Figura 2.

Utilizando-se a representação por grafos, o problema de minimização de perdas pode ser formalmente

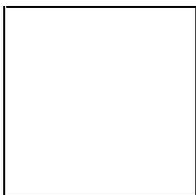
caracterizado como



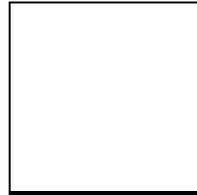
[3],



onde



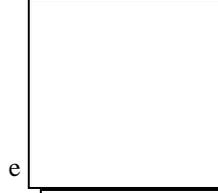
 é o conjunto de arcos com origem no nó k ,



é o fluxo de potência ativa no arco k ,

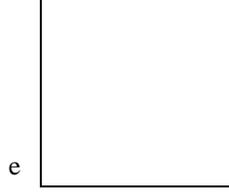
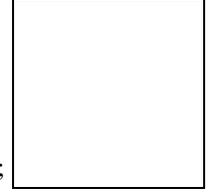


é o fluxo de potência reativa no arco k



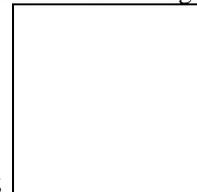
e

é a tensão no nó k ;



e

representam, respectivamente, as resistências e reatâncias das linhas agregadas ao arco k

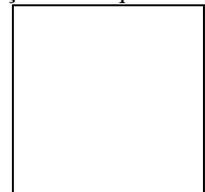


(ou seja, à chave k_i);

 é o conjunto de arcos correspondentes a chaves fechadas.

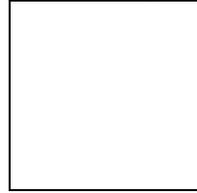
A solução do problema deve respeitar os limites nas tensões. Restrições de capacidade das linhas, chaves e demais componentes da rede precisam também ser observadas.

Supondo-se que a rede de distribuição é adequadamente

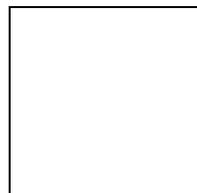


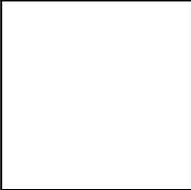
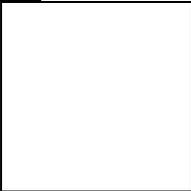
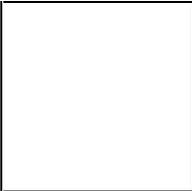
compensada e lembrando-se que

, o problema para encontrar a configuração de perdas mínimas pode ser simplificado na forma

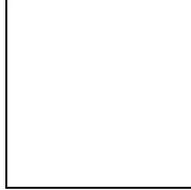


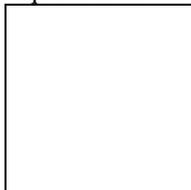
a seguir [3].

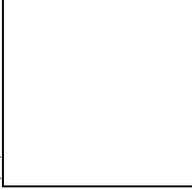
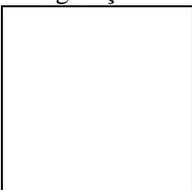


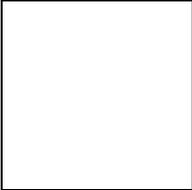
onde  é o fluxo de potência ativa (ou corrente) no arco ,  corresponde as resistências das linhas agregadas na chave k , \mathbf{A} é a matriz de incidência nó-arco associada ao grafo G , \mathbf{x} é o vetor de fluxos, \mathbf{b} é o vetor cujas componentes representam demandas ou a injeção de potência no nó raiz (por conveniência, atribui-se uma injeção de forma

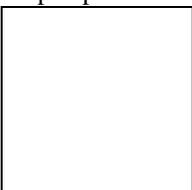
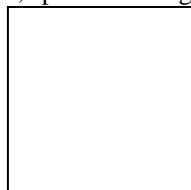
que ). Cada linha da matriz \mathbf{A} corresponde ao balanço de potências em um determinado nó do grafo que representa a rede de distribuição. Limites para os fluxos através das chaves são caracterizados pelos

vetores  e .

Como consequência da radialidade da rede, a solução do problema  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

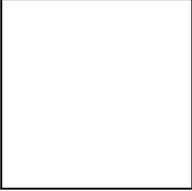
 variam quando mudam as configurações da rede (isto é, quando mudam as árvores ). Esta propriedade coloca o problema

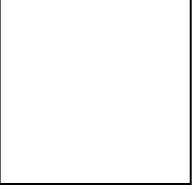
 no conjunto de problemas combinatoriais de solução muito difícil, onde o esforço de cálculo cresce exponencialmente com a dimensão do problema. Não por acaso, as abordagens bem sucedidas de solução para redes grandes são baseadas em heurísticas, onde se abandona a pretensão de garantir a obtenção de 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].

A perspectiva *zoom*, para abordagem dos problemas  e , é um refinamento da idéia de buscas informadas desenvolvida por Cavellucci e Lyra (1997). Os principais aspectos de buscas informadas aplicadas ao problema serão discutidos no próximo item. Segue-se o detalhamento da perspectiva *zoom*.

4. BUSCAS INFORMADAS

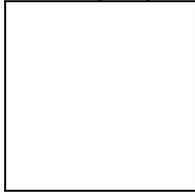
Usando os conceitos de inteligência artificial adotados por Cavellucci e Lyra (1997), configurações radiais que minimizem as perdas em redes de distribuição podem ser encontradas através de busca no *espaço de estados*, onde cada *estado* (também chamado de *nó* do grafo de busca) é caracterizado por uma configuração de rede com distribuição ótima de fluxos. A busca é iniciada no *estado inicial* (ou *nó inicial*), identificado com a solução do

problema  para a configuração de rede em anéis com todas as chaves fechadas. Estados sucessores são gerados pela abertura de chaves e solução

dos problemas  para as configurações de redes resultantes -- as perdas na rede aumentam sempre que uma chave é aberta para eliminação de um anel.

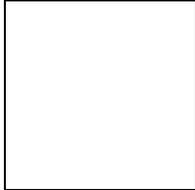
A geração de *nós sucessores* vai construindo uma *árvore de busca*, como representado na Figura 3 -- daqui em

diante chamaremos os estados de *nós*. Redes radiais são obtidas nos *nós terminais* (*folhas da árvore de busca*). O *nó objetivo* é o nó terminal associado a configuração de



mínimas perdas, solução do problema

O nó inicial e cada *nó interior* da árvore de buscas está associado a uma solução aproximada infactível (por não satisfazer a restrição de radialidade) do problema



. A infactibilidade vai sendo eliminada (a aproximação vai melhorando) com a geração de nós sucessores, como ilustra a Figura 3.

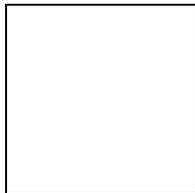
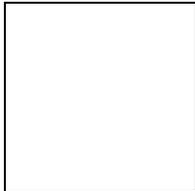


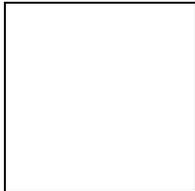
FIGURA 3. ÁRVORE DE BUSCA PARA OBTENÇÃO DE SOLUÇÃO DE PERDAS MÍNIMAS

O nó inicial e cada *nó interior* da árvore de buscas está associado a uma solução aproximada infactível (por não satisfazer a restrição de radialidade) do problema



. A infactibilidade vai sendo eliminada (a aproximação vai melhorando) com a geração de nós sucessores, como ilustra a Figura 3.

A maior parte dos problemas estudados na área de inteligência artificial procura soluções que satisfazem determinadas propriedades - factibilidade, por exemplo. No entanto, a procura de uma solução para



é um problema de busca do tipo *otimização combinatoria*, onde o nó objetivo deve ter as melhores propriedades do espaço de estados de acordo com determinado critério - mínimas perdas, no caso; esses problemas exigem muito esforço do processo de busca.

Procedimentos de buscas são “receitas” para escolha da ordem na qual são gerados os nós sucessores. Normalmente são classificados como *desinformados* ou

informados [12]. Nas buscas desinformadas, a ordem de geração dos nós não é influenciada pelas informações levantadas ao longo da busca. Por outro lado, as buscas informadas procuram usar todo o conhecimento disponível sobre o problema a ser resolvido, e estimativas sobre a porção do espaço de estados ainda não explorada, para guiar o procedimento de buscas em direções mais promissoras. Procedimentos de buscas bem sucedidos são caracterizados pela habilidade de descobrir um *caminho solução* do nó inicial até o nó objetivo com exploração de apenas uma pequena porção do espaço de estados (em outras palavras, gerando apenas um pequeno número de nós sucessores).

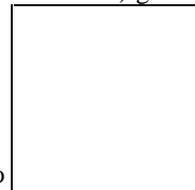
Três métodos de buscas informadas foram propostos por Cavellucci e Lyra (1997): *backtracking informada*, *backtracking heurística* e A^* . Os melhores resultados foram obtidos com a busca *backtracking heurística*.

A *backtracking* é uma busca em profundidade que procura soluções com um procedimento de geração de nós sucessores do tipo “último gerado primeiro a ser explorado” [12]. Se um nó terminal diferente do nó objetivo é encontrado, a busca retorna (em inglês, “backtracks”) para o nó mais próximo do caminho já percorrido que ainda tenha possibilidades de ser explorado (de gerar sucessores); gera um novo sucessor e continua a expandir o caminho de exploração, até encontrar o nó objetivo. A busca *backtracking informada* é construída pela introdução, na busca *backtracking*, do uso de conhecimentos sobre soluções já obtidas. Quando um nó n é gerado, o valor da solução para

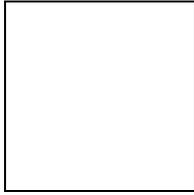


no nó $f(n)$ é comparado com o valor do total de perdas numa solução de referência. Se as perdas em n são maiores do que na solução de referência, a busca poda o caminho e retorna, evitando continuar a exploração ao longo de direções que (garantidamente) não levam a um nó objetivo. Sempre que a busca encontra uma configuração radial de rede (um nó terminal) com menor valor para as perdas, a solução de referência é atualizada.

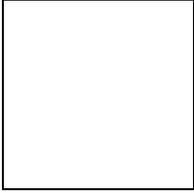
Conhecimentos adicionais foram incluídos na busca *backtracking informada*, caracterizando a busca *backtracking heurística*. Adotou-se uma função heurística que estima o acréscimo de perdas nas configurações associadas aos nós sucessores de um determinado nó; seu uso permite antecipar as podas, reduzindo o número total de nós (do espaço de estado) gerado. A função heurística



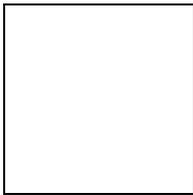
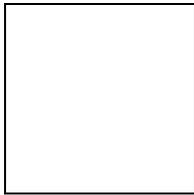
foi definida como



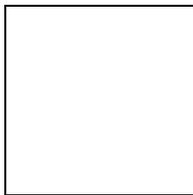
onde $g(n)$ é o aumento de perdas do nó inicial até n , e $h(n)$ é uma estimativa das perdas a partir do nó n até um nó terminal. A Figura 4 ilustra o conceito expresso em



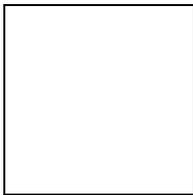
A função de estimação $h(n)$ foi associada ao número de anéis existentes na configuração associada ao nó n ,



onde $c(n)$ é o número de anéis em n e $h(n)$ é uma estimativa do aumento médio de perdas com a abertura de anéis (no caminho de n até um nó terminal).



Pode-se observar que $h(n)$ é inspirada na função de avaliação que caracteriza a família “A” dos procedimentos de busca em grafos [12]. No entanto, a



função $h(n)$ é usada na busca *backtracking heurística* para “envenenar” o processo de podas, enquanto as funções de avaliação nos algoritmos do tipo “A” são usadas para escolha de nós para expansão - um nó é considerado *expandido* quando todos os seus sucessores foram gerados [12].

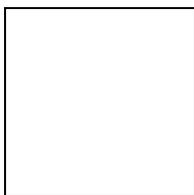
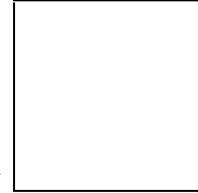
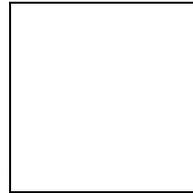


FIGURA 4. A FUNÇÃO HEURÍSTICA



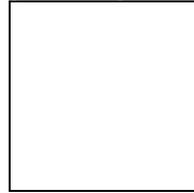
Pode-se observar que $h(n)$ é inspirada na função de avaliação que caracteriza a família “A” dos procedimentos de busca em grafos [12]. No entanto, a



função $h(n)$ é usada na busca *backtracking heurística* para “envenenar” o processo de podas, enquanto as funções de avaliação nos algoritmos do tipo “A” são usadas para escolha de nós para expansão - um nó é considerado *expandido* quando todos os seus sucessores foram gerados [12].

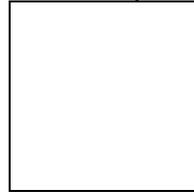
5. BUSCA ZOOM

A primeira fase da busca *zoom*, denominada “enfoque grande angular seletivo”, aborda o problema simplificado

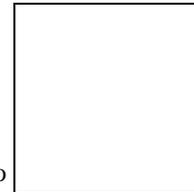


, fazendo uma sondagem ampla no espaço de soluções possíveis. Nesta fase, utiliza um procedimento semelhante a busca *backtracking heurística* [6].

Quando o “enfoque grande angular seletivo” encontra uma solução radial factível para o problema



, a perspectiva *zoom* inicia o “enfoque de teleobjetiva”, realizando o refinamento da solução através de uma busca local. Nessa fase, trabalha com a representação mais detalhada do sistema de distribuição,



caracterizada na formulação $h(n)$ -- ou seja, eventuais características de má compensação da rede serão também tratadas nesta fase.

5.1. Enfoque de Grande Angular Seletivo

A busca *backtracking heurística* considera todas as possibilidades de acionamento de chaves para abertura de anéis, em cada nó explorado. O “enfoque grande angular seletivo” da busca *zoom* guarda apenas um “conjunto

promissor” de chaves. Em cada nó, o “conjunto promissor” de chaves corresponde a um subconjunto das chaves que podem ser abertas no nó em exploração; será caracterizado por um número p de chaves, por onde passam os menores fluxos da rede. Quando p for igual a um, o método será idêntico ao de *abertura seqüencial de chaves* [11][14]; quando p corresponder a todas as possibilidades de abertura de anéis, o “enfoque grande angular seletivo” coincide com a busca *backtracking heurística*. A Figura 5 ilustra o “enfoque grande angular seletivo” com $p = 2$.

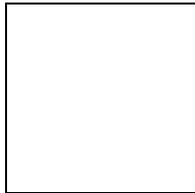
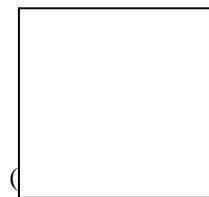


FIGURA 5. BUSCA GRANDE ANGULAR PARA P = 2

Considerando-se a função



(), construída para busca *backtracking heurística*, a *busca heurística modular* pode ser resumida na seqüência de passos descritos a seguir.

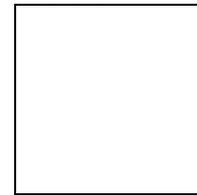
[Passo 0]. Inicialize a variável S com o valor para perdas associado a uma configuração (radial) de operação conhecida para a rede de distribuição.

[Passo 1]. Resolva o problema para a configuração de rede associada ao nó; coloque em ABERTO a lista de p chaves que formam anéis em ordem decrescente dos valores de fluxos (a chave de menor fluxo fica no topo da pilha ABERTO) - neste caso, as chaves não devem ser ordenadas de acordo com outro critério.

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

[Passo 3]. Gere um novo nó n , retirando (abrindo) a chave do topo da pilha ABERTO e resolvendo

o problema associado a rede resultante (para obter a nova distribuição ótima de fluxos e o total de perdas associadas, $g(n)$; adicione n a CAMINHO e calcule



[Passo 4]. Compare o valor

com S ; se , descarte o novo nó gerado, removendo-o da pilha CAMINHO, e volte ao Passo 2 (pode o caminho e retorne);

caso contrário se , continue.

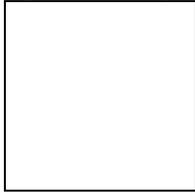
[Passo 5]. Identifique os anéis na rede associada ao nó n , coloque no topo de ABERTO a lista de p chaves que formam anéis, em ordem decrescente dos valores de fluxos (note que não se pode ordenar a lista de acordo com outro critério) e volte ao Passo 2; se não existirem anéis na rede associada ao nó n , continue.

[Passo 6]. Substitua S por $g(n)$ -- neste ponto da busca, $h(n) = 0$ e,

conseqüentemente, ; guarde a solução associada ao nó n e retire o nó do topo da lista CAMINHO (para retornar no caminho de exploração e continuar ao longo de novas

direções) -- n é o nó associado a rede radial factível com menor valor para perdas, encontrado até o momento; volte para o *Passo 2*.

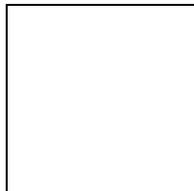
Após a obtenção da melhor solução para o problema



com o “enfoque grande angular seletivo”, a perspectiva *zoom* inicia o “enfoque de teleobjetiva”, realizando o refinamento da solução através de uma busca local.

5.2. Enfoque de Teleobjetiva

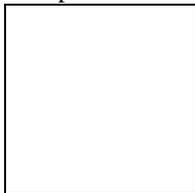
O “enfoque de teleobjetiva” faz o *ajuste fino* da solução, utilizando o método de *troca de ramos* na forma proposta por Baran e Wu [3]. Nessa fase, trabalha-se com a representação mais detalhada do sistema de distribuição,



caracterizada na formulação -- assim, eventuais aspectos de má compensação da rede serão considerados nesta fase.

Em linhas gerais, o método de redução de perdas por troca de ramos é implementado com a seqüência de passos descrita a seguir (nota-se que é uma busca local do tipo *gulosa*).

[*Passo 0*]. Para a melhor solução radial disponível para o problema de minimização de perdas



, calcule os valores das tensões para os nós correspondentes às extremidades de chaves abertas.

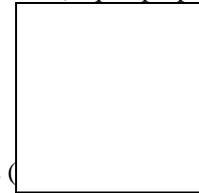
[*Passo 1*]. Para cada chave aberta b onde haja uma diferença de tensões significativa entre seus terminais, faça:

- a. Identifique um anel formado na rede, quando a chave b é fechada;
- b. Percorrendo o anel a partir do terminal de maior diferença de potencial, encontre a chave m cuja abertura proporcionará a maior redução de

perdas ().

Se não existirem chaves com quedas de tensões significativas entre seus terminais, Pare (considere concluído o processo de melhoria da solução com o “enfoque de teleobjetiva”).

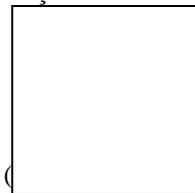
[*Passo 2*]. Realize a operação de chaves (fechamento de b e abertura de m) que proporcionar a maior



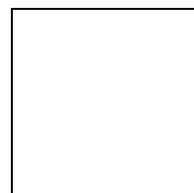
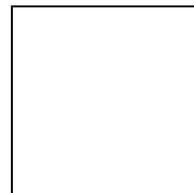
redução de perdas () na rede.

[*Passo 3*]. Atualize os valores das tensões e volte ao *Passo 1*.

A Figura 6 ilustra o procedimento de redução de perdas por troca de ramos. A estimativa de redução de perdas com a operação de fechamento da chave b e abertura da



chave m () é calculada pela fórmula a seguir [3].



onde os elementos do conjunto L são os arcos entre os nós $o, \dots, k-1, k$; os elementos no conjunto R são os arcos entre os nós $o, \dots, n-1, n$ e k .

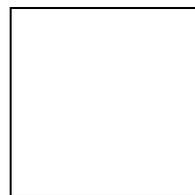
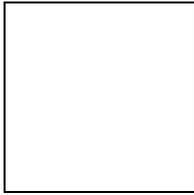
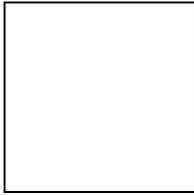


FIGURA 6. AJUSTE FINO POR TROCA DE RAMOS

6. SOLUÇÃO DE P_R POR GRADIENTE REDUZIDO

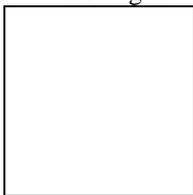
Um aspecto fundamental para implementação do “enfoque grande angular seletivo”, na busca *zoom* é a abordagem de otimização utilizada para a solução do



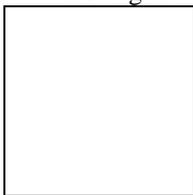
problema . Merlin e Back (1975) mostraram que a solução de mínimas perdas para redes em anéis com cargas resistivas corresponde a aplicação das duas leis de Kirchhoff. Esta propriedade foi usada para encontrar soluções ótimas através de metodologias de cálculo de fluxos de cargas, tanto por Merlin e Back como por outros autores que se apoiaram nas suas idéias [2][13][14].

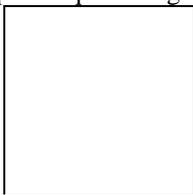
Cavellucci e Lyra [6], descobriram os atrativos de uma rota alternativa, através do método do gradiente reduzido para otimização de fluxos em redes com função objetivo não linear (GR). Esses atrativos podem ser resumidos em quatro pontos principais:

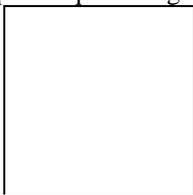
1. o método gradiente reduzido baseado na estrutura de redes do problema é muito rápido;
2. inexistem dificuldades de estabilidade numérica na abordagem de problemas de grande porte;
3. a estrutura de redes permite uma forma simples de montagem dos problemas sucessivos



, representados na Figura 5;

4. a solução de um problema , associado a um determinado nó da Figura 5, é aproveitada quase que integralmente para a



solução de  em um nó sucessor.

7. ESTUDOS DE CASOS

Os estudos de casos desenvolvidos foram elaborados para verificar as idéias discutidas neste trabalho. Eles consideram a aplicação da metodologia a um conjunto de redes reais, da área de concessão da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL). As características das redes estão resumidas na Tabela 1.

TABELA 1. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS REDES DOS ESTUDOS DE CASOS

Rede	N.Nós	N.Arcos	Chav.Abertas
A	1528	1558	30
B	1449	2490	42
C	2274	2316	43
D	1597	1644	47
E	6860	7063	199
F	6066	6269	203
G	6097	6332	203
H	6558	6826	269
I	5994	6363	370

Todos os programas foram codificados em linguagem C++, utilizando o compilador *Borland C++ Builder 5*. As informações sobre tempo de processamento foram obtidas em computador tipo PC, com processador AMD-K6-II de 300 Mhz, 64 Mb de memória RAM e sistema operacional Windows.

A Tabela 2 apresenta os resultados da aplicação do “enfoque de teleobjetiva” diretamente à configuração radial com a qual a rede operava (configuração inicial) --- as perdas associadas a esta configuração são denominadas “perdas iniciais”. Observa-se que o “enfoque de teleobjetiva” aplicado diretamente à configuração inicial corresponde ao método *troca de ramos*, na forma proposta por Baran e Wu [3].

A Tabela 3 apresenta os resultados da aplicação do “enfoque de grande angular”, utilizando-se parâmetro de ramificação unitário ($p = 1$). Com esta ramificação, a busca corresponde ao método *abertura seqüencial de chaves* [11][14].

O “enfoque de grande angular” foi também aplicado isoladamente com parâmetros de ramificações $p = 3$ e $p = 5$. Comparando-se os casos $p = 3$ com $p = 1$ (apresentados na Tabela 3), houve melhora de redução de perdas apenas na Rede B. A melhora foi de 1%, com um tempo de processamento 4 vezes maior. Os casos com $p = 3$ e $p = 5$ obtiveram exatamente a mesma redução de perdas - mas, naturalmente, a busca com $p = 5$ requer maior tempo de processamento.

TABELA 2. ENFOQUE DE TELEOBJETIVA (TROCA DE RAMOS)

Rede	Perdas Iniciais (kW)	Perdas Reduzidas (kW)	Tempo (segundos)	Redução (%)
A	458	402	0,06	12,23
B	1011	980	0,11	3,07
C	1766	1685	0,11	4,59
D	442	404	0,06	8,17
E	2277	2091	1,32	8,17
F	1735	1723	0,33	0,69
G	2863	2850	0,22	0,45
H	2124	2100	0,38	1,13
I	3235	3115	0,88	3,71

TABELA 3. ENFOQUE DE GRANDE ANGULAR COM $P = 1$

Rede	Perdas Iniciais (kW)	Perdas Reduzidas (kW)	Tempo (min:seg)	Redução (%)
A	458	402	0:1,43	12,23
B	1011	966	0:30,98	4,45
C	1766	1676	0:12,03	5,10
D	442	413	0:6,21	6,56
E	2277	2123	1:46,55	6,76
F	1735	1684	1:15,25	2,94
G	2863	2854	0:38,78	0,31
H	2124	2124	3:23,11	0,00
I	3235	3126	12:35,11	3,37

A comparação das Tabela 2 e Tabela 3 leva às observações a seguir:

1. Do ponto de vista de redução de perdas, não temos indícios para distinguir uma alternativa vencedora entre os métodos *troca de ramos* (“enfoque de teleobjetiva”) e *abertura seqüencial de chaves* (“enfoque de grande angular”).
2. O tempo de execução do “enfoque de teleobjetiva” é desprezível em relação ao “enfoque de grande angular”.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos com a aplicação da busca *zoom* completa; ou seja, com a aplicação do “enfoque de grande angular” seguido do “enfoque de teleobjetiva”.

Comparando-se a Tabela 4 com as Tabela 2 e Tabela 3, vemos que a busca *zoom*, proposta neste trabalho, é claramente a alternativa mais eficaz para redução de perdas. Observa-se também que o tempo de processamento da busca *zoom* é semelhante ao da *abertura seqüencial de chaves*.

TABELA 4. BUSCA ZOOM

Rede	Perdas Iniciais (kW)	Perdas Reduzidas (kW)	Tempo (min:seg)	Redução (%)
A	458	402	0:1,43	12,23
B	1011	948	0:31,14	6,23
C	1766	1675	0:12,08	5,15
D	442	403	0:6,32	8,82
E	2277	2078	1:59,30	8,74
F	1735	1657	1:15,90	4,50
G	2863	2834	0:39,27	1,01
H	2124	2100	3:23,40	1,13
I	3235	3052	12:35,93	5,63

Os resultados obtidos em relação ao aumento do parâmetro de ramificações p , no “enfoque de grande angular”, podem sugerir que não vale a pena arcar com os custos computacionais de um valor para p acima do unitário. No entanto, acredita-se que as redes estudadas não permitem uma observação conclusiva em relação a este ponto; a aplicação da metodologia a redes com perdas elevadas e muitas possibilidades de ramificações podem levar a outros resultados.

Como comentário final, deve-se destacar que as redes estudadas são de poucas perdas. Conseqüentemente, a aplicação da busca *zoom* a essas redes pode ser considerada um teste duro para a metodologia.

8. AMBIENTE COMPUTACIONAL

Os estudos de configurações de rede para redução das perdas utilizam grande quantidade de dados de entrada. Dependendo do porte da rede de distribuição usada, o número aproximado de trechos e chaves varia entre 1500 a 7000, gerando quantidades equivalentes de nós e arcos na estrutura de grafo, conforme pode-se verificar na Tabela 1. Antes de serem usados pelo programa computacional de otimização (busca *zoom*), os dados devem ser preparados no que diz respeito a extração dos dados da rede, montagem e edição da rede e formatação dos dados para o otimizador. Caso esse processo apresente dificuldades operacionais, cria-se um obstáculo para a utilização do programa computacional de otimização, conduzindo, em alguns casos, ao completo esquecimento e conseqüente perda do investimento realizado.

Os dados das redes dos estudos de casos foram obtidos com o auxílio do programa computacional denominado REDE, utilizado pela CPFL nos estudos de planejamento do sistema elétrico. Ele compreende um ambiente computacional gráfico, desenvolvido em Visual Basic, cujas principais funções são: extração dos dados, edição da rede de distribuição, montagem da rede radial e cálculos de fluxo, queda de tensão e perdas. Esse ambiente computacional simplifica o processo de

preparação dos dados de entrada para o programa de otimização.

Com o objetivo de tornar transparente o processo de conversão de dados, execução do otimizador e visualização dos resultados, fez-se a integração do programa de otimização ao ambiente computacional gráfico do programa REDE. A Figura 7 representa a arquitetura computacional implantada na CPFL.

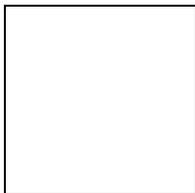


FIGURA 7. ARQUITETURA DO AMBIENTE COMPUTACIONAL

A comunicação entre o programa REDE e o programa otimizador é realizada através de arquivo texto com o formato previamente definido. Essa interface é suficientemente simples e de fácil manutenção.

A Figura 8 mostra a tela principal do ambiente computacional. A rede é apresentada no formato unifilar com indicação dos elementos da rede: transformadores, capacitores, chaves e subestações. Os alimentadores são diferenciados por cores e pontos de referência acrescentados para melhor localização da rede.

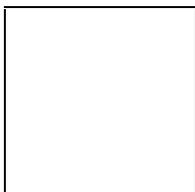


FIGURA 8. TELA PRINCIPAL DO AMBIENTE COMPUTACIONAL

A execução do programa de otimização de perdas resume-se na escolha da função “Executar otimização” no menu do programa REDE, conforme ilustra a Figura 9.

A seguir são solicitados os parâmetros para a busca *zoom*:

- Tipo das chaves que podem ser chaveadas: chave a óleo, chave faca e chave fusível. Pode-se escolher um tipo de chave, todas ou uma combinação delas.
- Número de ramificações – equivalente ao parâmetro p para o enfoque grande angular seletivo.
- Tempo máximo permitido para execução - excedido esse tempo o otimizador grava a melhor solução obtida até momento.
- Carregamento a ser utilizado - carga do ano base ou do ano horizonte.

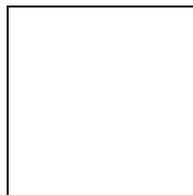


FIGURA 9. FUNÇÃO DE EXECUÇÃO DO OTIMIZADOR DE PERDAS

Após a programa otimizador encerrar a execução, pode-se “Executar o chaveamento” sugerido pelo otimizador e visualiza-los, escolhendo as funções apropriadas no menu (Figura 10).

A Figura 11 mostra os chaveamentos realizados, indicando sua localização e alterando a cor dos trechos com a respectiva cor do alimentador para o qual foram transferidos.

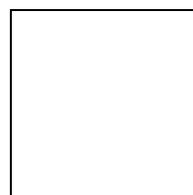


FIGURA 10. FUNÇÕES DE EXECUTAR E VISUALIZAR OS CHAVEAMENTOS PÓS OTIMIZAÇÃO

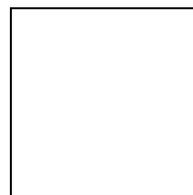


FIGURA 11. CHAVEAMENTOS INDICADOS

Os cálculos do fluxo de potência, queda de tensão e perdas são executados sob solicitação. Com estes dados, pode-se realizar uma análise para verificar a conveniência ou não da nova configuração e decidir em manter ou desfazer os chaveamentos. Uma outra alternativa é escolher novos valores para os parâmetros do otimizador e executá-lo novamente.

9. BUSCA DE EFICIÊNCIA NO SISTEMA

Considerando a facilidade do uso e o tempo reduzido para obter-se uma alternativa de configuração com as perdas reduzidas, o método de otimização está sendo aplicado aos estudos de planejamento realizados na divisão de planejamento do sistema elétrico da CPFL. Essa sistemática tem como objetivo buscar a melhor condição operativa do sistema elétrico existente. O otimizador pode sugerir uma configuração alternativa, reduzindo as perdas técnicas, ou confirmar a configuração atual; a rede apresentando perdas reduzidas tende a melhorar a eficiência do sistema de distribuição.

Como exemplo da aplicação do otimizador de perdas pela equipe da CPFL, pode-se destacar o estudo de duas redes reais. As principais características das redes utilizadas são apresentadas na Tabela 5.

TABELA 5. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS REDES DA APLICAÇÃO DO OTIMIZADOR DE PERDAS

Características	Rede A	Rede B
Comprimento total dos alimentadores (km)	212	556
Número de consumidores	12.197	13.135
Total de chaves manobráveis	194	557
Número de chave a óleo	7	7
Número de chave faca	25	56
Número de chave fusível	162	494
Número de barras	1.310	2.596
Consumo mensal (kWh)	5.036.224	4.280.338
Demanda total (kVA)	14.280	14.911

A Tabela 6 mostra os dados das duas rede para o ano base de planejamento. Para exemplificar, no cálculo do “Custo das Perdas” considerou-se o valor médio de compra de energia de R\$ 50,00/MWh. O carregamento dos transformadores é calculado em relação a potência nominal (kVA/kVAn).

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos, considerando os chaveamentos indicados pelo *otimizador de perdas*. Nota-se melhoras significativas do perfil de tensão e perdas. Com a nova distribuição do fluxo de potência, eliminou-se a sobrecarga existente em trechos das redes, contribuindo para aumentar a vida útil do sistema.

O ganho de energia foi significativo sobretudo quando se considera que o custo de implantação é reduzido.

TABELA 6. DADOS DA REDE PARA O ANO BASE

	Rede A	Rede B
Maior queda de tensão (%)	12,21	13,40
Perdas (kW)	688,88	899,20
Perdas (kWh)	2.215.362	1.933.285
Custo das Perdas (R\$)	110.768,10	96.664,25
Trechos acima de 100% de carregamento	3	6

TABELA 7. DADOS DA REDE APÓS A RECONFIGURAÇÃO

	Rede A		Rede B	
	Valor	Redução (%)	Valor	Redução (%)
Número de chaveamentos	8	n.a.	6	n.a.
Maior queda de tensão (%)	10,16	20,17	7,91	69,40
Perdas (kW)	615,80	11,87	560,2	60,51
Perdas (kWh)	1.984.434	11,64	1.234.143	56,64
Custo das perdas (R\$)	99221,70		61.707,15	58,77
Trechos acima de 100% de carregamento	0	100	0	100
Ganho de energia (kWh)	230.928		699.142	
Ganho anual (R\$)	11.546,40		34.957,10	

10. CONCLUSÕES

O trabalho apresentou uma nova abordagem para o problema de redução de perdas em redes de distribuição de energia elétrica, através de reconfigurações. Conceitos de buscas informadas da área de inteligência artificial, otimização de funções não lineares de fluxos em redes e heurísticas de otimização locais, são coordenados para construção de busca *zoom*.

O termo “zoom” é uma metáfora associada a idéia de que a busca de boas soluções para o problema é baseada em enfoques amplos e detalhados do espaço de soluções.

A nova metodologia tem o aspecto unificador de englobar, como casos particulares, as duas técnicas mais difundidas para solução do problema: *abertura seqüencial de chaves e troca de ramos*.

Estudos de casos em redes reais do sistema elétrico brasileiro qualificam as idéias apresentadas.

O ambiente computacional apresentado inclui a interface gráfica para visualização da rede e a integração com o *otimizador de perdas*. A integração acrescentou ao ambiente computacional facilidade e flexibilidade para obter configurações alternativas.

A aplicação desse ambiente computacional foi exemplificada em dois estudos reais de redes da área de concessão da CPFL

Agradecimentos. O trabalho teve apoio da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), CNPq, FAPESP e CAPES. Os autores gostariam também de agradecer ao engenheiro Francisco José Bassotelli, da CPFL, pelas muitas sugestões no desenvolvimento do trabalho. O apoio das instituições e colegas mencionados não significa que necessariamente endossem as idéias apresentadas; elas são de exclusiva responsabilidade dos autores.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ahuja, R., Magnanti, T. e Orlin, J. "Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications. Prentice Hall, Englewood Cliffs. 1993.
- [2] Augugliaro, A. Dusonchet, L. e Mangione, S. Na efficient greedy approach for minimum loss reconfiguration of distribution networks. *Electric Power Systems Research* **35**: 167-176. 1995.
- [3] 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.
- [4] Bunch, J. B., Miller, R. D. e Wheeler, J. E. Distribution system integrated voltage and reactive power control. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101:284-289. 1982.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Garey, M. S. e Johnson, D. S. "Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness". W. H. Freeman, New York.
- [9] 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.
- [10] Lyra, C., Fernandes, C. P., Cavellucci, C. Perspectiva "Zoom" para redução de perdas na distribuição de energia elétrica. Trabalho aprovado para apresentação no XIV Congresso Brasileiro de Automática, Natal. 2002.
- [11] Merlin, A. e Back, H. Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in a urban power distribution system. *Proceedings of the 5th Power System Computation Conference (PSCC)*, paper 1.2/6, Vol. 1, PSCC, Cambridge, UK, pp.1-18. 1975.
- [12] Pearl, J. "HEURISTICS: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving". Addison-Wesley, Reading. 1984.
- [13] Peponis, G. J., Papadopoulos, M. e Hatziargyriou, N. Distribution network reconfiguration to minimize resistive line losses. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **10**(3): 1338-1342. 1995.
- [14] Shirmohammadi, D. e Hong, H. W. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery* **4**(2): 1492-1498. 1989.