

Otimizando o Projeto de Redes Secundárias de Distribuição de Energia Elétrica

V.J. Garcia, E. Yoshimoto, J.F.V. González, P.M. França, C. Lyra - UNICAMP;
C. Cavellucci - THOTH SOLUTIONS e F. Bassotelli - CPFL

RESUMO

Devido ao volume de investimentos e custos associados, os sistemas de distribuição de energia elétrica justificam o emprego de métodos que promovam economia no projeto e na manutenção das redes de distribuição. Como a rede secundária brasileira tem grande capilaridade, a sua construção envolve não só custos fixos de instalação de condutores e transformadores como também custos relativos à operação da mesma, sobretudo custos de perdas devido às baixas tensões. Este trabalho propõe um método automático para auxiliar o projeto de redes novas de distribuição. A partir do conhecimento das cargas previstas para os consumidores, o método determina a localização dos trafos e suas capacidades, além de fornecer as bitolas dos cabos dos circuitos secundários e primários. O critério utilizado é a minimização dos custos fixos e variáveis, inclusive o de perdas. É apresentada uma aplicação a uma rede real e os resultados do método são comparados com os obtidos de forma manual.

PALAVRAS-CHAVE

Otimização do planejamento, projeto de redes, redes secundárias, sistemas elétricos de distribuição.

I. INTRODUÇÃO

O sistema de distribuição de energia elétrica é a parte do sistema de potência que abrange desde as subestações rebaixadoras até os transformadores (sistema de distribuição primário) e destes até a entrada elétrica dos consumidores (sistema de distribuição secundário). Devido às baixas tensões, é no sistema de distribuição onde ocorre a maior parcela das perdas. No Brasil, os valores típicos para as perdas técnicas nas redes de distribuição estão entre 7 e 15% [5]. Esses números indicam a existência de espaços promissores para economias de energia por redução de perdas.

Um planejamento adequado da rede de distribuição deve considerar não apenas a minimização das perdas elétricas, como também a minimização dos custos de instalação e manutenção de equipamentos. Além disso, questões adicionais como qualidade de energia elétrica, confiabilidade da rede, limitações nos orçamentos, possibilidade de expansão, entre outros, também podem exigir consideração [12].

A bibliografia internacional relacionada a problemas de expansão de redes de distribuição de energia elétrica é quase que integralmente dedicada ao problema da expansão da rede primária [9][12]. Em grandes linhas, procura-se desenvolver alternativas que levem a boas indicações para a quantidade e localização das subestações rebaixadoras, a sua interligação com as linhas de transmis-

são e o traçado dos alimentadores primários. O problema da expansão da rede secundária, por sua vez, tem recebido muito pouca atenção na literatura internacional [3][4], principalmente devido ao fato de que, ao contrário do Brasil, a maioria dos países tem uma rede secundária pouco extensa, se comparada à rede primária. Recentemente, Costa et al. [6][7] abordaram o problema de otimização do planejamento da rede secundária de forma exata, propondo modelos matemáticos para o mesmo.

Este trabalho propõe um método GRASP [10] para resolver o problema de planejamento de redes secundárias de distribuição de energia elétrica (PPRSD). O artigo está organizado da seguinte maneira: a próxima seção define e caracteriza o problema de planejamento do sistema secundário de distribuição, particularmente para os aspectos referentes ao PPRSD; a seção III detalha o método proposto por meio de um pseudo-código do algoritmo elaborado; os resultados obtidos usando uma rede real de teste são apresentados na seção IV e as análises e conclusões são apresentadas na seção V.

II. O PLANEJAMENTO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

A expansão de um sistema de distribuição faz-se necessária sempre que a demanda de uma região apresenta crescimento significativo, aproximando-se dos limites de operação dos equipamentos. A expansão pode envolver a construção ou ampliação de subestações, instalação e recondutoramento de trechos de alimentadores, entre outras operações - todas elas com altos custos de investimentos associados.

Além dos custos de investimento, é necessário considerar o custo de operação da rede. Wolff [13] argumenta que as perdas na distribuição chegam a representar mais da metade das perdas existentes em um sistema elétrico, devido principalmente à baixa tensão utilizada nestes sistemas.

Os altos custos de investimento e de operação, somados ao fato que o sistema de distribuição é o que se conecta diretamente com os consumidores, conferem uma importância destacada ao planejamento da expansão deste sistema. Ações derivadas do processo de planejamento podem acarretar ganhos substanciais nos custos de expansão e operação.

A subdivisão clássica que se faz no sistema de distribuição considera o nível de tensão de operação como critério. Em um primeiro plano tem-se o problema das redes de distribuição primárias (tensão típica de 13,8kV); no segundo plano temos o problema de planejamento das redes de distribuição secundárias (tensão 220V). A Figura 1 ilustra esquematicamente os dois níveis.

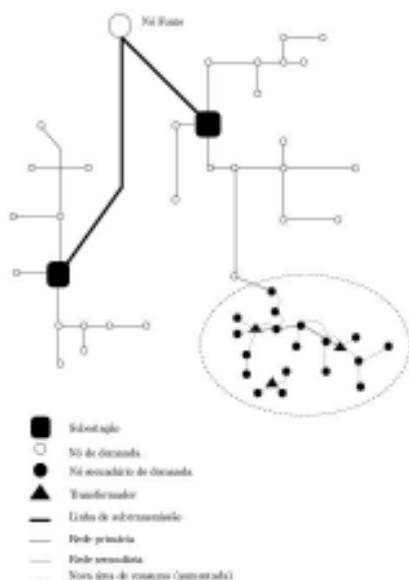


FIGURA 1 - Representação de um sistema de distribuição.

As publicações encontradas na literatura abordando o tema da “expansão do sistema de distribuição” quase sempre ignoram a rede secundária, tratando apenas de encontrar as configurações ótimas ou sub-ótimas para a localização/ampliação das subestações e para o roteamento dos alimentadores primários. Entretanto, em países como o Brasil, cujo sistema secundário constitui uma parte significativa do sistema de distribuição, pode ser extremamente benéfica a utilização de métodos de otimização avançados para o planejamento do sistema secundário.

A seguir descreve-se algumas características desse sistema que é objeto de estudo neste trabalho, seguida da definição do problema resolvido.

A. Particularidades do Sistema Secundário

É interessante notar que o problema do planejamento da rede secundária possui similaridades com o da rede primária. Se na rede primária tem-se o problema de localização das subestações, na secundária tem-se o problema da localização dos transformadores. Na rede primária necessita-se conectar as subestações à rede de transmissão e aos centros de carga, enquanto na rede secundária necessita-se conectar os transformadores às linhas primárias e aos consumidores.

Esta semelhança poderia levar à conclusão (precipitada) de que é suficiente aplicar as técnicas de planejamento da rede primária à rede secundária para se obter um bom planejamento. Entretanto, a rede secundária possui uma série de características particulares, que tornam necessário o desenvolvimento de metodologias específicas.

Uma destas particularidades, provavelmente a mais importante, é a que diz respeito à dimensão do problema. Para a rede primária, um grande número de restrições limita a quantidade de possíveis locais para a instalação das subestações (e.g., restrições estéticas, ambientais, disponibilidade de terrenos e restrições de custo). Já na rede secundária, praticamente todo poste é candidato a receber um transformador. Este fato, somado à oferta de diferentes capacidades possíveis para os transformadores, confere ao problema um número muito alto de alternativas de soluções. Como dificuldade adicional para o tratamento computacional do problema, o número de alternativas de soluções cresce exponencialmente com a dimensão da rede em estudo.

Além disso, o problema da primária está geralmente associado à expansão da rede por causa do esgotamento da capacidade atual. Neste caso, a rede existente tem um peso fundamental e confere uma inércia ao problema matemático que facilita a análise das alternativas de expansão. Apesar de no caso da rede secundária o problema de expansão também estar presente, muitas vezes é necessário planejar redes novas, em bairros ou loteamentos ainda sem consumidores. É quando o número de possíveis alternativas de solução apresenta um crescimento exponencial com o tamanho do problema, dificultando a escolha de uma solução otimizada.

Um outro aspecto fundamental da rede secundária é que ela conecta o sistema elétrico ao consumidor final, tornando mais críticas questões como queda de tensão, confiabilidade e balanço de cargas entre fases. Essas questões precisam ser tratadas pelo planejamento, já que as redes secundárias são rígidas com pouco espaço para reconfigurações frequentes.

B. Definição do problema

O problema de planejamento de redes secundárias tratado neste artigo contempla o planejamento de redes novas (*greenfields*). O objetivo é construir uma rede que atenda as demandas dos consumidores de forma segura, confiável e econômica. Para tanto adota-se uma função objetivo que minimiza os custos de investimento e o custo das perdas, sujeita às restrições do problema e que incluem a capacidade dos equipamentos, configuração radial e limites de tensão.

Assume-se que dispõem-se de dados que permitem a previsão da demanda dos futuros consumidores de um loteamento, de acordo com classe social e tipo de consumidores (comercial, residencial, etc.). Além disso dispõem-se também dos mapas das futuras ruas do loteamento, incluindo a posição dos postes.

A partir dessas informações é possível estimar a demanda por poste. Outra informação conhecida a priori é a localização da rede primária que será usada para alimentação do loteamento (postes). A Figura 2 ilustra esquematicamente essas informações, listadas também a seguir:

- Traçado das ruas;
- Posição dos postes;
- Demanda por poste;
- Postes já supridos com rede primária.

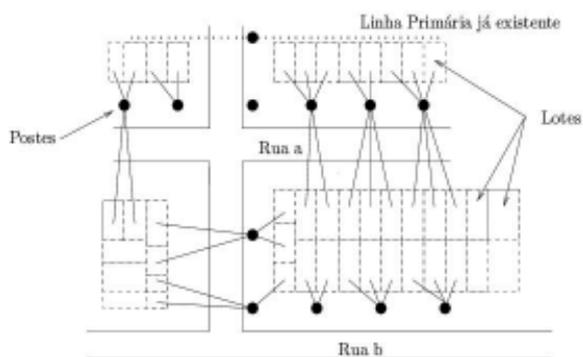


FIGURA 2 - Dados iniciais de entrada: traçado das ruas, posicionamento dos postes e delimitação dos lotes.

A figura 3 apresenta a rede na forma de um grafo não direcionado. Note que as conexões poste-lote da Figura 2 foram usadas para calcular a demanda por poste. Além disso, o traçado das ruas foi convertido nas conexões entre os postes. Nem todos os postes vizinhos podem ser conectados. O nó marcado duplamente indica a presença de tensão primária.

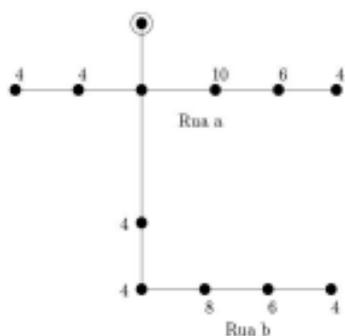


FIGURA 3 - Dados de entrada apresentados na forma de um grafo não direcionado.

A partir destas informações de entrada, o método proposto deve ser capaz de indicar a solução de planejamento que mais economicamente atende a demanda. Ou seja, o método deve ser capaz de apresentar a solução que minimiza os custos de instalação de equipamentos e os custos de perdas, encontrando, assim, a localização e tipo dos transformadores, e o traçado dos circuitos secundários e primários.

Portanto, o conjunto de dados de saída pode ser resumido em:

- Postes que devem receber transformadores;
- Capacidade de cada transformador instalado;
- Circuito radial secundário correspondente a cada transformador;
- Traçado da rede primária conectando a rede primária já existente aos transformadores.

A figura 4 e a figura 5 mostram uma possível solução.

Cada transformador, representado na figura como um triângulo, tem sua demanda associada conhecida (KVA). O método deve escolher um transformador com capacidade nominal suficiente para atender esta demanda. A Figura 4 mostra a localização dos transformadores e o traçado dos circuitos secundários, enquanto que a Figura 5 mostra o circuito primário de interligação.

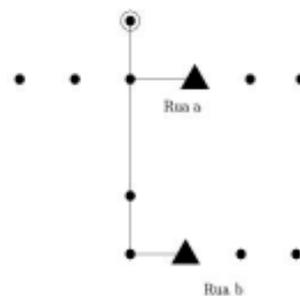


FIGURA 4: Dados de saída: localização dos transformadores e traçado dos circuitos secundários.

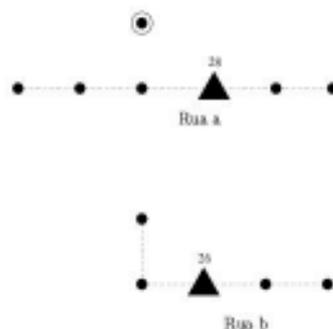


FIGURA 5 - Dados de saída: traçado do circuito primário de interligação.

III. MÉTODO PROPOSTO

A metodologia de resolução adotada neste trabalho assemelha-se com as já descritas pela literatura. Backlund e Bubenko [2], Carneiro et al. [4], Ganjavi [8] e Costa et al. [6][7] decompõem o PPRSD em subproblemas e os resolvem separadamente, dado que a sua resolução de forma global é impraticável para redes de tamanho real. Os três subproblemas clássicos são a localização dos transformadores (p_1), o roteamento da rede secundária (p_2) e o roteamento dos alimentadores primários (p_3).

O método proposto, tal como em Carneiro et al. [4] e Costa et al. [6][7], p_1 é resolvido como um problema de *p-medianas*, p_2 como um problema de *caminho mínimo* e p_3 como um problema de *árvore geradora mínima*, seguindo a hierarquia p_1, p_2 e p_3 , conforme ilustra a Figura 6. A diferença em relação aos trabalhos anteriores é a utilização de outros algoritmos para a solução dos subproblemas.

O método GRASP [10][11] é proposto para resolução do PPRSD e concentra-se no problema com maior nível na hierarquia (p_1). Os demais, p_2 e p_3 , são resolvidos a partir da solução do primeiro, respeitando a hierarquia citada anteriormente. Um pseudo-código do método GRASP proposto é apresentado na Figura 7. Executa-se um ciclo de iterações para cada

valor de p , aqui identificado como o número de transformadores em análise. Ao final adota-se como solução aquela associada ao valor de p que apresentou o menor custo.

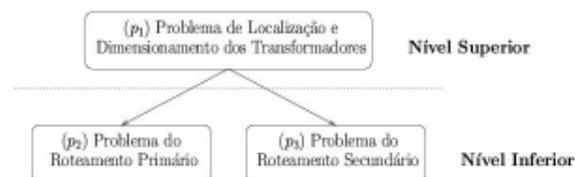


FIGURA 6 - Hierarquia de solução dos subproblemas.

Procedimento GRASP(numIteracoes)

1. $p = p_0$; melhorSol = 0;
2. Faça
3. melhorSolp = ConstrutivoGuloso(p);
4. melhorSol = BuscaLocal(melhorSolp);
5. melhorSol = CriaRoteamento(melhorSolp);
6. $i = 0$;
7. Enquanto $i < \text{numIteracoes}$ faça
8. sol = ConstrutivoAleat(p);
9. sol = BuscaLocal(sol);
10. sol = CriaRoteamento(sol);
11. Se sol < melhorSolp
12. melhorSolp = sol;
13. Se melhorSolp < melhorSol
14. melhorSol = melhorSolp;
15. $p = p + 1$;
16. Enquanto Critério de Parada não é satisfeito;
17. Fim.

FIGURA 7 - Pseudo-código do método GRASP

O único parâmetro do método é o número de iterações, que define quantas soluções aleatórias serão geradas (passo 8) e posteriormente otimizadas pela busca local (passo 9). Os passos 4, 5 e 6 destinam-se à inicialização da melhor solução para um determinado valor de p , obtida através de um algoritmo guloso associado a uma busca local. O laço mais externo, do passo 2, destina-se a buscar o p que promove o melhor custo. O critério de parada adotado estabelece um número fixo de iterações do laço externo (2-16) a partir do momento em que o p escolhido for factível. Conforme demonstram os passos 13 e 14, termina-se o algoritmo com a melhor solução entre todos os valores de p analisados.

Uma importante observação a ser feita refere-se aos subproblemas resolvidos: os algoritmos construtivos, tanto o guloso (passo 3) quanto o aleatório (passo 8), resolvem o subproblema p_j , com a determinação da posição e a capacidade dos transformadores; o procedimento “CriaRoteamento” destina-se a resolver os subproblemas p_2 e p_3 , exatamente nesta ordem.

As subseções a seguir descrevem os três procedimentos básicos enunciados no pseudo-código da Figura 7.

A. Algoritmos Construtivos

Como é possível perceber pelo pseudo-código da Figura 7, há dois algoritmos construtivos no método proposto, justamente porque o primeiro, “ConstrutivoGuloso”, é totalmente determinístico, o que tornaria sem sentido a realização de várias iterações criando soluções idênticas e otimizando-as. O segundo é, portanto, a variação desse algoritmo guloso, introduzindo certa aleatoriedade no processo de forma a obter soluções distintas cada vez que é executado.

O algoritmo construtivo utilizado nesse trabalho resolve o problema de localização/dimensionamento dos transformadores como um problema de p -medianas não-capacitado, o qual consiste em encontrar p transformadores de modo que cada nó de demanda seja conectado ao transformador mais próximo e que a soma dos momentos elétricos seja minimizada. Por momento elétrico entre um dado transformador e um dado nó da rede entende-se o produto da demanda deste nó pela distância mínima que os separa. Despreza-se a capacidade dos transformadores, pois o problema não-capacitado é bem mais simples de resolver.

O algoritmo guloso do passo 3 (Figura 7) compreende, primeiramente, a escolha da melhor mediana baseado no cálculo dos momentos elétricos. Estando a melhor mediana fixada, determina-se a segunda melhor e assim sucessivamente até completar a alocação da p -ésima mediana.

O outro algoritmo, “ConstrutivoAleat” (passo 6 da Figura 7), escolhe a primeira mediana de forma aleatória, de maneira que esta seja distinta da melhor mediana. A determinação de cada uma das demais medianas é feita a partir da formação de um conjunto com k nós-candidatos, sendo k aleatório (k é menor que o número de nós) e cada um destes nós determinado aleatoriamente. É escolhida a próxima mediana como sendo aquela que promover o melhor ganho entre todas do conjunto, repetindo-se sucessivamente o mesmo procedimento até que todas as p medianas estejam alocadas.

B. Determinação dos circuitos

A determinação do roteamento dos circuitos secundários e primário corresponde aos problemas p_2 e p_3 , respectivamente. A seguir detalha-se a resolução para ambos.

- **Determinação do circuito secundário (p_2):** A abordagem utilizada é a do *problema de caminhos mínimos*. Tenta-se conectar cada nó de demanda ao transformador mais próximo. De fato, trata-se apenas da idéia de minimização dos momentos elétricos. Um ponto interessante nesta escolha é que ela tende a respeitar uma outra restrição do PPRSD, não abordada diretamente, qual seja a restrição das quedas de tensão. De fato, ao se usar o momento elétrico tanto como critério para localização dos trafos quanto para o traçado dos circuitos secundários, tende-se a minimizar o problema das quedas de tensão.
- **Determinação do circuito primário (p_3):** Como na rede primária os custos fixos são predominantes [3], basta minimizar o tamanho da rede, podendo-se desprezar os custos das perdas. Uma forma de atacar este problema é através do *Problema de Steiner*, que consiste em conectar

com menor custo possível alguns dos nós de um grafo, podendo ou não utilizar os nós restantes (que se usados serão conhecidos como nós de *Steiner*). Esse problema é resolvido através de uma metodologia heurística baseada no algoritmo de Prim [1]. Primeiramente, monta-se um grafo completo não orientado com os nós onde já existe rede primária e com os nós onde serão instalados transformadores. O custo de um arco ligando o nó i ao nó j deste grafo é dado pelo caminho mínimo entre os arcos i e j . De posse deste subgrafo completo (de cardinalidade $n' < n$), aplica-se o algoritmo de Prim, obtendo-se a árvore de menor custo que conecta estes pontos (caso não existissem outros nós no grafo). É feita então uma busca por pontos de *Steiner* no grafo original (cardinalidade n). Como qualquer ponto de *Steiner* tem grau ≥ 3 , o que se faz é uma lista com todos os nós n' mais os nós com grau ≥ 3 . Então, avalia-se o custo de se adicionar um nó candidato a *Steiner* na árvore obtida anteriormente com o algoritmo de Prim. O nó que apresenta maior ganho é inserido e o procedimento reiniciado, até que nenhum nó de *Steiner* apresente ganho ao ser inserido na árvore.

C. Busca local

Uma busca local é usada para compensar a perda de qualidade introduzida pela decomposição do problema. Ela atua alterando a posição das medianas e recalculando o custo global, verificando, portanto, o impacto que a troca de uma mediana tem na solução global do problema e não apenas em p_i .

Conforme ilustra a Figura 7, passos 4 e 9, é fornecida a solução construtiva gerada, devidamente avaliada, com os respectivos circuitos primário e secundário definidos. O procedimento consiste em efetuar trocas, isoladamente para cada mediana, considerando um número máximo de vizinhanças avaliadas (m). Assim, o mínimo local é retornado toda vez que os vizinhos imediatos não promoverem soluções melhores que a atual ou quando o número máximo de vizinhos for atingido.

É importante salientar que, para cada troca de posição da mediana avaliada, é feito o recálculo do custo global, envolvendo a solução dos problemas p_2 e p_3 . Tal recálculo não chega a onerar o algoritmo em tempo computacional, uma vez que ambos são suficientemente rápidos.

IV. RESULTADOS

Para avaliar o método proposto, decidiu-se comparar a solução encontrada por ele com uma outra obtida manualmente por especialistas.

A rede estudada possui 124 nós e 132 arcos, sendo 45 nós com demanda. Para uma comparação justa, ambas as soluções tiveram exatamente os mesmos tipos de cabos e transformadores disponíveis. A implementação foi feita em linguagem C++ e utilizou-se um computador padrão IBM-PC, com processador ATHLON K6-III 800MHz, 512 MB RAM, sistema operacional LINUX versão 2.4.

A Figura 8 e a Figura 9 ilustram as redes primária e

secundária da solução manual, obtidas pelos especialistas, respectivamente. Os pontos maiores da Figura 8 representam os transformadores, enquanto asteriscos circulados indicam a chegada da rede primária. Na Figura 9 os pontos maiores também representam os transformadores, além da espessura das linhas indicar diferentes tipos de cabos (com bitolas diferentes).

A Figura 10 e Figura 11 ilustram as redes primária e secundária da solução obtida pelo método proposto, respectivamente. A posição dos transformadores é a grande diferença entre as duas soluções, ocasionando diferentes soluções para os circuitos primário e secundários.

Pela comparação da tabela 1 percebe-se que a solução encontrada pelo método reduziu os custos fixos em detrimento de um aumento dos custos variáveis, no entanto isso não comprometeu sua superioridade em termos globais. A redução obtida foi de aproximadamente 2%, sendo preciso 8,6 s de CPU, correspondendo a 200 iterações do método. Embora possa parecer pequena, a redução encontrada torna-se significativa em termos monetários quando se tratar redes maiores. Outro diferencial importante introduzido pelo método proposto é a sua facilidade de utilização e a consequente rapidez com que se pode fazer estudos de diferentes cenários gerados pelos planejadores. Apesar de não descrito neste trabalho, o método conta com uma ferramenta de apoio gráfico que prepara automaticamente os arquivos dos dados de entrada e fornece visualização dos resultados.

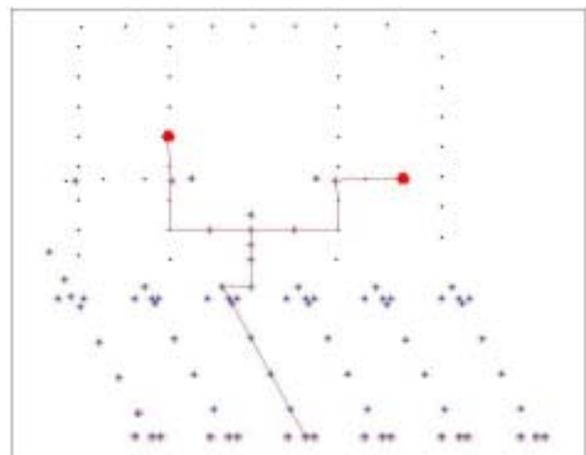


FIGURA 8 - Rede primária da solução manual.

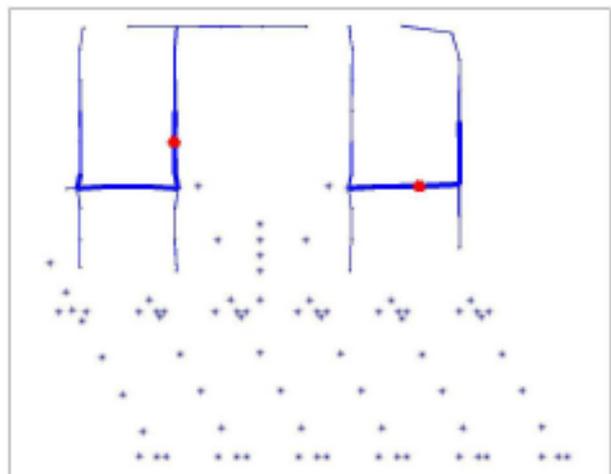


FIGURA 9 - Rede secundária da solução manual

V. CONCLUSÕES

Nesse trabalho apresentou-se um método GRASP para resolver o problema de Planejamento de Redes Secundárias de Distribuição de Energia Elétrica. Primeiramente foram apresentadas algumas justificativas para o estudo de tal problema, seguidas da definição do problema de planejamento. A seguir tratou-se das particularidades do sistema secundário, com a descrição do problema e definição dos dados de entrada e saída. Por fim detalhou-se o método desenvolvido com os respectivos resultados obtidos.

Embora um pouco restritos, os estudos práticos mostram a potencialidade e eficiência do método. Pretende-se instâncias maiores para uma validação mais efetiva, bem como realizar estudos que contemplem reformas em redes existentes. O método encontra-se preparado para tais estudos, sendo apenas necessário a definição da abrangência e profundidade de tal proposta.

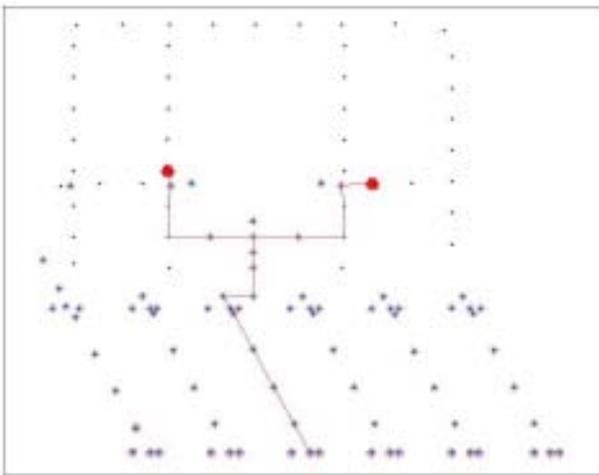


FIGURA 10 - Rede primária da solução obtida pelo método.

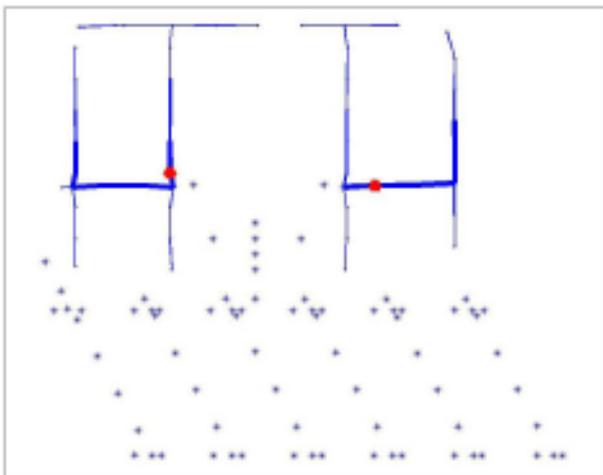


FIGURA 11 - Rede secundária da solução obtida pelo método.

TABELA 1

CUSTOS DAS SOLUÇÕES EM R\$

	Sol. manual	Sol. método
Custos fixos	38.481,1	37.211,7
Custos variáveis	4.381,4	4.782,3
Custo total	42.862,5	41.994,0

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ahuja, R.K., Magnanti, T.L., Orlin, J.B., "Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications", Prentice Hall, 1993.
- [2] Backlund, Y., Bubenko, J.A., "Computer-aided distribution system planning", *Electrical Power & Energy Systems*, 121, pág. 35-45, 1979.
- [3] Carneiro, M.S., "Planejamento a longo prazo em sistemas de distribuição de energia elétrica", Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Unicamp, 1990.
- [4] Carneiro, M.S., França, P.M., Silveira, P.D., "Long-Range planning of power distribution systems: secondary networks", *Computers and Electrical Engineering*, 22(3), pág. 179-191, 1996.
- [5] Cavellucci, C., "Buscas Informadas Baseadas em Grafos para Minimização das Perdas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica", Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Unicamp, 1998.
- [6] Costa, A.M., França, P.M., "Planejamento de Redes Secundárias de Energia Elétrica", *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automática*, 2-5 setembro, Natal, pág. 2563-2568, 2002.
- [7] Costa, A.M., França, P.M., Lyra, C., "Power Systems Secondary Network Planning", *Proceedings of the 2002 IEEE Conference on Industrial Technology, ICIT'02*, Bangkok, Thailand, Dec.11-14, 6 pages-CDROM, 2002.
- [8] Ganjavi, M.R., "Coordinated Comprehensive Design of Distribution Systems at Medium and Low Voltage Levels", *16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - IEE*, 5(6), 2001.
- [9] Gonen, T., "Electric Power Distribution System Engineering", McGraw-Hill, 1986.
- [10] Pardalos, P.M., Resende, M.G.C., "Handbook of Applied Optimization", Oxford University Press, New York, 2001.
- [11] Resende, M.G.C., Werneck, R.F., "A GRASP with path-relinking for the p-median problem", *Technical Report TD-5E53XL*, AT&T Labs Research, Florham Park, NJ 07932 USA, 2002.
- [12] Vaziri, M., and K. Tomsovic, K., Gonen, T., "Distribution Expansion Problem Revisited: PART 1 Categorical Analysis and Future Directions", *Proceedings of the Fourth IASTED International Conference on Power and Energy Systems (PES 2000)*, Marbella, Spain, 2000.
- [13] Wolff, R.F., "The new electronic frontier distribution design", *Electrical World*, pág. 65-80, 1982.