

MÉTODO HEURÍSTICO PARA O PLANEJAMENTO DE ENCAMINHAMENTOS MÚLTIPLOS DE ALIMENTADORES EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Leonardo da C. Brito, Pedro H. da S. Palhares, Paulo C. M. Machado e Adson S. Rocha
Universidade Federal de Goiás
Av. Universitária, n. 1488 – Qd. 86 – Bl. A - 3º piso, CEP 74.605-010 – St. Leste Universitário -
Goiânia – Goiás – Brasil
brito@eeec.ufg.br, phpalhares@gmail.com, pcesar@eeec.ufg.br, adsonrocha@gmail.com

Everton Luís da Costa, Izabel M. de D. Amaral
CELG Distribuição
Rua 2, Qd. A-37, n. 505, Ed. Gileno Godoi, Jardim Goiás
CEP 74.805-180, Goiânia – Goiás – Brasil
everton.lc@celg.com.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um método heurístico de otimização multi-objetivo para o encaminhamento quase-ótimo de múltiplos alimentadores implementado num software associado a uma base de dados geográfica existente, bem como a sua aplicação em um caso real com informações georeferenciadas da empresa de distribuição de energia elétrica CELG D. A grande complexidade inerente ao planejamento do atendimento de múltiplas cargas, considerando-se tanto as restrições elétricas quanto as limitações geográficas, motivou a elaboração e implementação da ferramenta computacional com vistas na automatização do processo. Resultados da aplicação do referido método mostram sua eficácia na proposição de soluções de menor custo e maior qualidade.

PALAVRAS CHAVE. Encaminhamento de alimentadores, Heurística multi-objetivo, Rede de distribuição.

ABSTRACT

This paper presents a heuristic multi-objective optimization method for the quasi-optimal routing of multiple feeders implemented in software associated with an existing geographic database, as well as its application in a real case with geographically referenced information from the CELG D electrical power distribution utility. The complexity inherent in the planning of care for multiple loads, considering both the electrical constraints on the geographical limitations motivated the development and implementation of computational tool aimed at automating the process. Results of application of this method show its effectiveness in proposing solutions to lower cost and higher quality.

KEYWORDS. Feeder Routing. Multi-Objective Heuristics. Distribution Network.

Main area (inform by priority the área of the article because JEMS system makes the classification alfabeticaly)

1. Introdução

O planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica é uma tarefa complexa e demorada, para a qual se requer massiva e detalhada quantidade de informações técnicas e espaciais. Tipicamente, compreende a seleção e o posicionamento de equipamentos de rede, incluindo o encaminhamento de alimentadores. A natureza espacial de alguns custos tomados no planejamento de distribuição de energia tem motivado a aplicação de sistema de informação geográfica (GIS) no encaminhamento (ou roteamento) de alimentadores elétricos, conforme Fozdar (2007), Falaghi (2005) e Monteiro (2005). Paralelamente, aspectos relacionados às limitações impostas pelo dimensionamento de alimentadores, perdas de energia, e viabilidade da estrutura de rede fizeram surgir métodos significativos de otimização na literatura, como visto em Fozdar (2007), Gómez (2004), Boulaxis (2002), Kiran (1982) e Rajan (2002).

Indiscutivelmente, o planejamento ótimo leva a economia de investimentos em infraestrutura de rede de distribuição, o qual pode ser alcançado com auxílio de ferramentas computacionais especializadas. Com esse tipo de software, dado um cenário de demandas de clientes, podem-se gerar soluções para o encaminhamento de alimentadores de distribuição de energia elétrica que podem garantir o atendimento a unidades consumidoras com o menor custo possível, atendendo, concomitantemente, a todas as restrições impostas (restrições de qualidade, como queda de tensão e capacidades de fornecimento das subestações e física de transformadores, e de custos, como comprimento total dos alimentadores, número de transformadores e quantidade subestações). Com isso, o uso de uma ferramenta de apoio à tomada de decisão que permita minimizar os custos de expansão e de reorganização de redes de distribuição torna-se uma questão de economia.

Neste sentido, o presente trabalho apresenta uma plataforma de estudo/planejamento de redes de distribuição de energia elétrica que contém, além das funcionalidades típicas de edição de elementos de rede e métodos de simulação, a avaliação e otimização de sub-redes. A aplicação se mostrou válida tanto para problemas em que não há ainda planta instalada, ou cargas já atendidas, quanto para problemas em que há planta instalada e cargas atendidas e não atendidas, independentemente do tamanho e da quantidade de sub-redes de distribuição de energia elétrica. Para tanto, integrou-se à plataforma um módulo de simulação de sub-rede por meio de cálculo de fluxo de potência (Grainger (1994)) e foram implementados os métodos de triangulação, busca de caminho mínimo em grafo e avaliação de soluções, apresentados na seção 2. As aplicações dos métodos mencionados num estudo de caso mostram a eficácia do software na provisão de soluções para o encaminhamento de múltiplos alimentadores, como mostrado na seção 3. Ao final do trabalho, na seção 4, são apresentadas as conclusões e colocadas as perspectivas para a continuidade do estudo.

2. Desenvolvimento

2.1 Definição do Problema

Nesse trabalho, abordou-se o problema de encaminhamento de alimentadores no cenário em que um conjunto de cargas deve ser atendido de maneira satisfatória, minimizando o custo e respeitando limitações elétricas e geográficas. Neste processo, considerou-se a possibilidade de conexão de subconjuntos de cargas a qualquer uma das sub-redes disponíveis indicadas pelo planejador no processo de otimização.

Quanto aos aspectos elétricos, tomaram-se dados dos seguintes elementos de rede: 1) Subestações (tensões no primário e secundário, relação de transformação, capacidade de transformação, perdas no ferro, corrente de excitação); 2) Alimentadores (comprimento, resistência, impedâncias indutiva e capacitiva, quantidade de fases encaminhadas); 3) Reguladores (tensão regulada); 4) Bancos de Capacitores (potência reativa); 5) Transformadores de Distribuição, vistos como Cargas (potência aparente máxima demandada, fator de potência). Os valores das cargas foram fornecidos diretamente pelo sistema GIS da Celg D (demanda máxima), não tendo sido consideradas as incertezas inerentes a tais grandezas. Como aspectos geográficos consideraram-se: mapa de relevo; mapa morfológico; mapa rodoviário; e quaisquer

outros necessários para a formação do mapa, composto por pontos e polígonos restritivos, que é usado como base para a geração do grafo – doravante denominado simplesmente “Grafo” – com as possibilidades de encaminhamentos dos alimentadores. Os polígonos denominados restritivos correspondem a polígonos definidos pelo planejador para os quais se atribuem “pesos de passagem” referentes aos custos equivalentes para atravessá-los.

Tanto os referidos dados elétricos como os geográficos foram tomados como parâmetros otimizáveis ou condições limitadoras e usados pelo método computacional no processo de geração de redes de custo mínimo.

2.2 Geração do Grafo

Os vértices do Grafo correspondem ao conjunto de pontos formado pelas novas cargas a serem atendidas, pelos pontos auxiliares (ou pontos de passagem) indicados explicitamente pelo planejador (usuário), os vértices dos polígonos restritivos e pelas raízes, sendo essas últimas também indicadas pelo planejador como possíveis pontos de conexão das sub-redes disponíveis.

Para a aplicação do algoritmo de encaminhamento é necessário definir o Grafo que fornece as possibilidades de passagem de alimentadores. O Grafo pode ser gerado de duas formas no método proposto:

- 1) Tomam-se os pontos auxiliares, as raízes e as novas cargas como vértices e aplica-se o procedimento de triangulação de Delaunay (Barber (1996)), no qual as arestas dos triângulos resultantes compõem o Grafo, ou
- 2) Tomam-se os pontos auxiliares, as raízes e as cargas como vértices e aplica-se o procedimento de triangulação de Delaunay num primeiro passo. Em seguida, insere-se um ponto de Torricelli (ou de Steiner) (Skiena (1997)) dentro de cada triângulo previamente formado. No último passo, incluem-se esses pontos no conjunto inicial de vértices e aplica-se novamente o procedimento de triangulação de Delaunay. As arestas resultantes compõem o Grafo.

Para finalizar a formação do Grafo, tomam-se cada um dos seus triângulos adjacentes e insere-se uma aresta entre os seus vértices não-comuns.

A forma de geração 1, mais simples, melhora o desempenho do procedimento de otimização devido à redução do espaço de busca em detrimento da possível perda de soluções sensivelmente melhores. Por outro lado, a forma 2 permite que sejam utilizados, de forma explícita e exata, pontos intermediários (ou pontos de Torricelli) que reduzem o comprimento total dos encaminhamentos.

2.3 Geração da Floresta Inicial

Uma floresta é formada pelo conjunto de arestas utilizadas para ligar as novas cargas às raízes das sub-redes. Adotou-se o termo “floresta” porque se podem ter, por exemplo, duas raízes, cada uma presente em uma sub-rede, que são utilizadas para receber os encaminhamentos de dois grupos distintos de novas cargas. Configurar-se-iam, nesse caso, duas árvores, cada qual correspondente a uma sub-rede. A floresta inicial, a mais óbvia e simples de se gerar, é formada pelo conjunto (sem repetições) de arestas do Grafo que levam cada uma das novas cargas à raiz mais próxima.

2.4 Procedimento para Encaminhamento dos Alimentadores

Tendo-se primeiramente formado o Grafo, aplica-se o método explicitado no procedimento que se segue para o encaminhamento de múltiplos alimentadores.

procedimento: Encaminhar Alimentadores

- 1) Atribuir valores aos parâmetros de otimização.
- 2) Carregar o conjunto de vértices e arestas do Grafo.
- 3) Gerar a floresta inicial e tomá-la como floresta corrente.

enquanto condição de parada não é satisfeita **faça**

4) Formar um laço na floresta corrente, inserindo uma aresta entre dois vértices tomados aleatoriamente, excluindo-se os pontos auxiliares do sorteio.

para cada aresta do laço **faça**

5) Remover a aresta corrente, formando uma floresta sem laços fechados.

6) Simular e avaliar as sub-redes (ou proposta de solução).

fim para

7) Tomar, como solução corrente, a melhor solução (floresta) obtida até a iteração corrente.

fim enquanto

fim procedimento

O procedimento acima apresentado otimiza iterativamente a floresta inicial, possibilitando: i) a formação de caminhos que agrupam cargas visando formar um encaminhamento único (entroncamento) até elas, reduzindo o custo de implantação da solução; ii) a distribuição de cargas entre as sub-redes ou entre encaminhamentos distintos até um ponto de conexão de uma única sub-rede, de forma a alcançar um balanço de fluxo de potência satisfatório, eliminando violações elétricas e mantendo o custo num valor aceitável; iii) e evitar passagens de alto custo referentes a restrições geográficas impostas pelo ambiente ou mesmo determinadas explicitamente pelo planejador.

2.5 Avaliação da Solução

Uma solução é composta pela floresta de encaminhamentos feitos das cargas até as raízes indicadas nas sub-redes disponíveis. A avaliação dessa solução engloba os custos de infraestrutura e de perdas de potência, contemplados respectivamente no vetor de objetivos (C_I, C_P) , além das penalizações referentes a violações elétricas de tensão e de corrente, contempladas no vetor de violações de restrições (V_T, V_C) , respectivamente. O vetor de violações indica o quanto a corrente e a tensão estão excedendo os limites determinados pelo planejador. Os dois vetores são tomados numa avaliação multi-objetivo e multi-restrição (Michalewicz (2004)), na qual duas propostas de solução, i e j , são comparadas da seguinte forma:

- 1) Se nenhuma das soluções apresenta violação de corrente ou de tensão, ou seja, $(V_T^i, V_C^i) = (0,0)$ e $(V_T^j, V_C^j) = (0,0)$, então é superior aquela que apresenta o melhor vetor de objetivos, isto é, apresenta ambos os objetivos com valores inferiores aos da outra solução. Caso contrário, as soluções são equivalentes.
- 2) Se uma das soluções apresenta violação e a outra não, então é superior aquela que não apresenta violação de corrente e de tensão.
- 3) Se ambas as soluções apresentam violação de corrente ou de tensão, então é superior aquela que apresenta o melhor vetor de violações de restrições, isto é, apresenta ambas as restrições com valores inferiores aos da outra solução. Caso contrário, as soluções são equivalentes.

Este método de classificação é aplicado em todo o conjunto corrente de propostas de solução formadas no passo 5 do procedimento da seção 2.4, de forma a identificar as soluções não-inferiores, ou seja, aquelas que não são superadas por nenhuma das demais presentes no conjunto. Uma das soluções não-inferiores é tomada aleatoriamente como solução corrente do passo 7 do referido procedimento.

3. Exemplo de Aplicação

Foram usadas informações georeferenciadas da empresa de distribuição de energia elétrica CELG D. O exemplo de aplicação selecionado é ilustrado na Figura 1. Nesse exemplo de aplicação, foram utilizados: um único tipo de alimentador, encaminhamento trifásico, 400 iterações no procedimento da seção 2.4, os dois tipos de grafos (simples e com pontos de

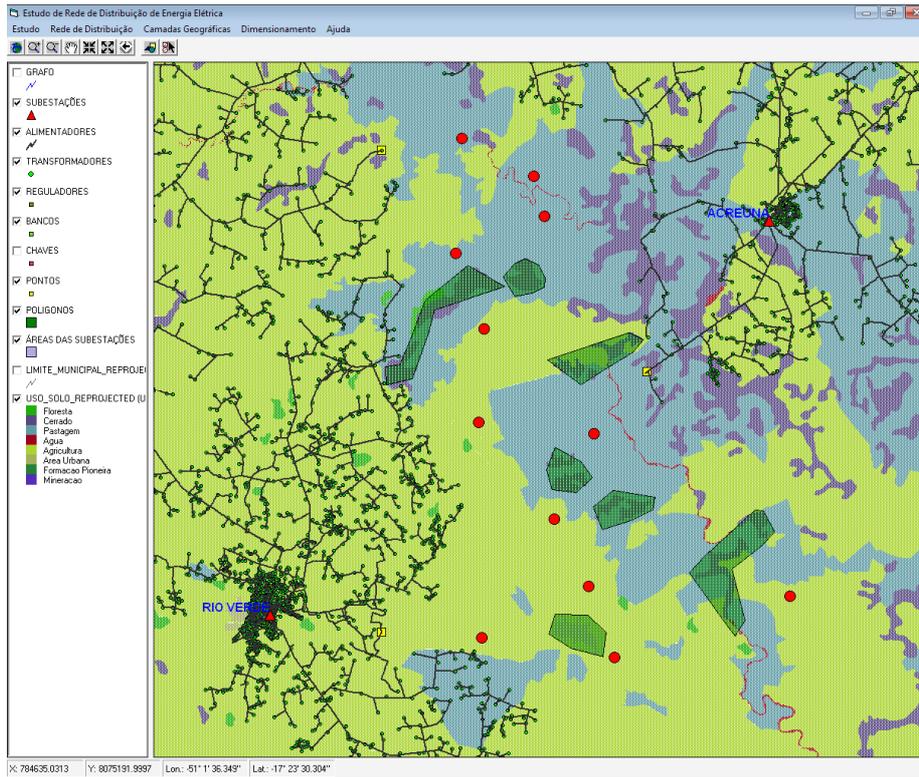


Figura 2. Definição das novas cargas a serem atendidas e dos polígonos restritivos.

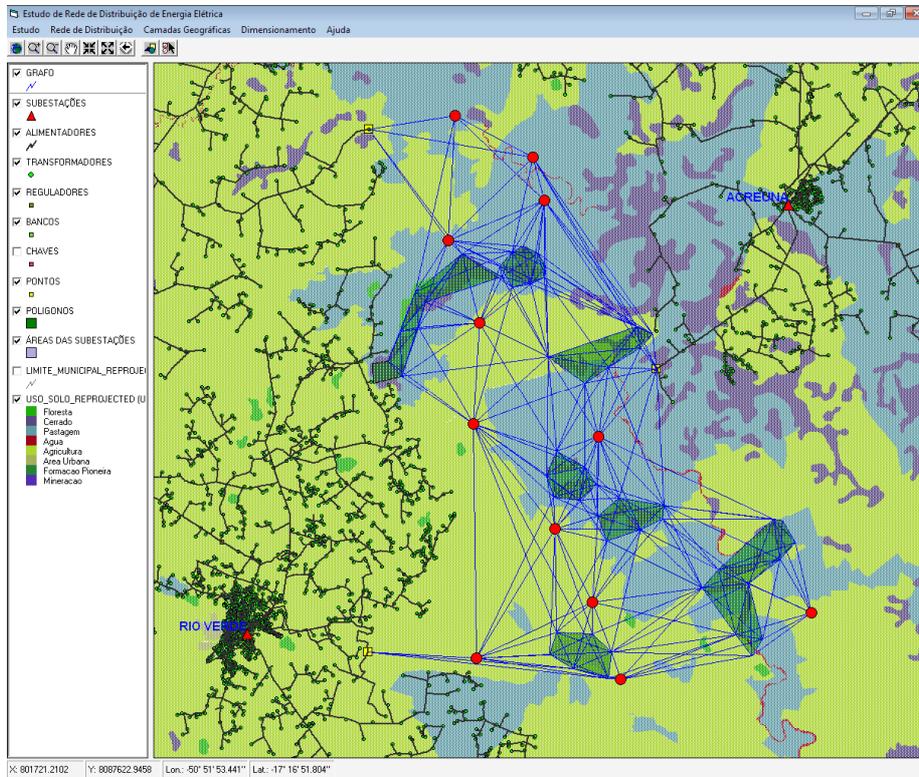


Figura 3. Grafo simples.

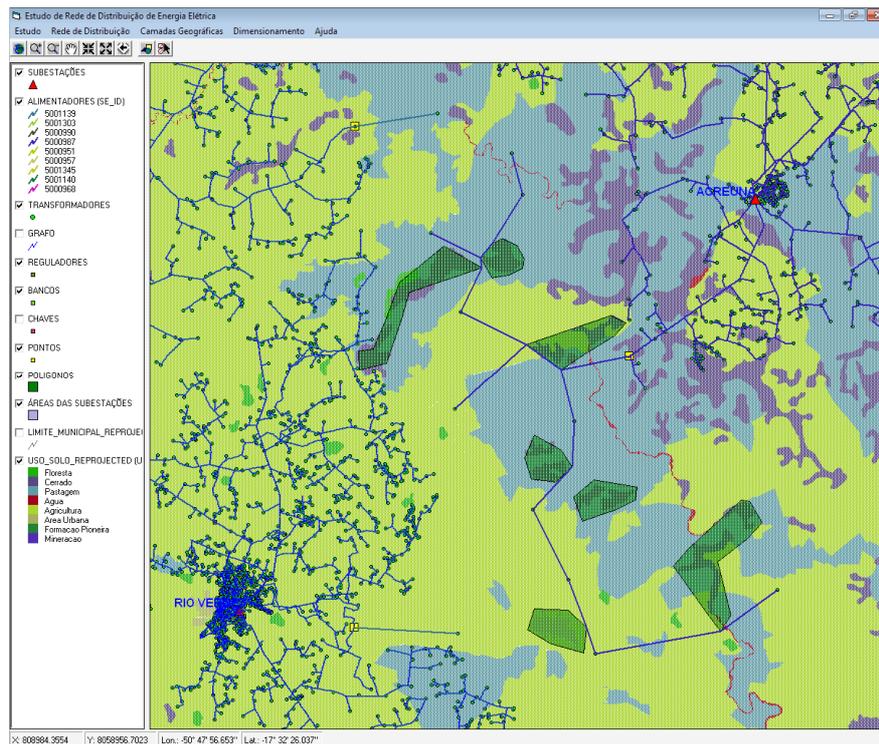


Figura 4. Encaminhamento obtido.

A Figura 5 mostra o grafo de encaminhamentos com pontos de Torricelli e a Figura 6 mostra o resultado obtido sem violações e com um vetor de custos igual a $(C_I, C_P) = (\text{R}\$390.391,00, 284\text{kW})$.

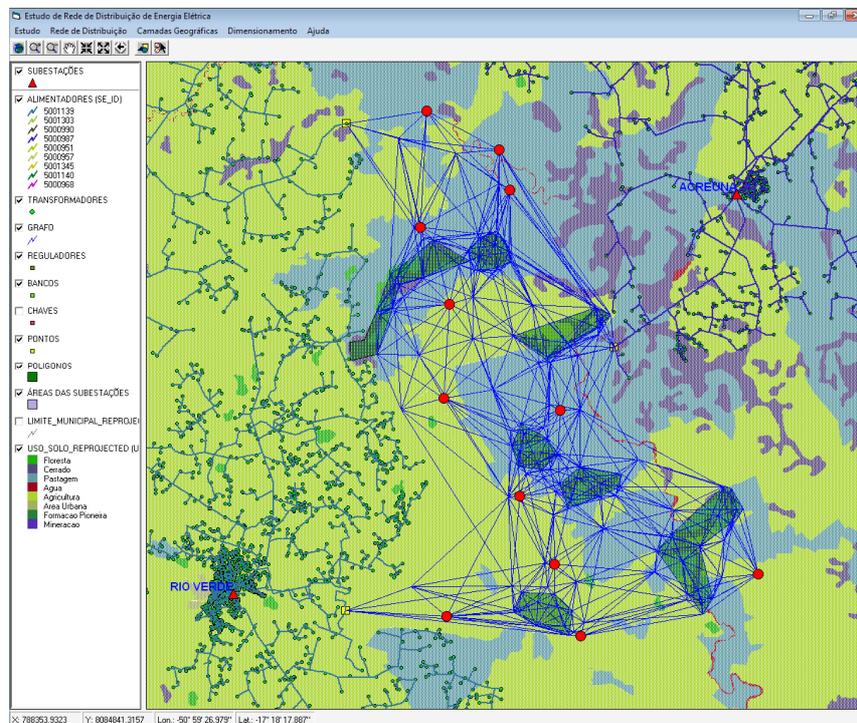


Figura 5. Grafo de encaminhamentos com pontos de Torricelli.

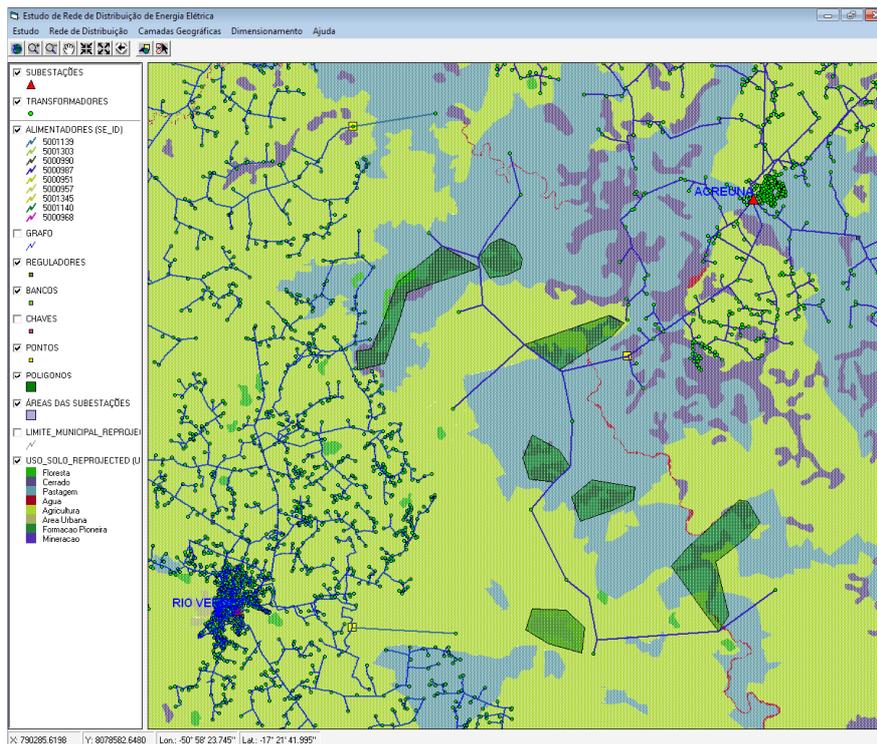


Figura 6. Encaminhamento obtido com pontos de Torricelli.

A Figura 7 mostra a grade de pontos auxiliares inserida pelo planejador e a Figura 8 apresenta o grafo simples gerado utilizando-se tais pontos.

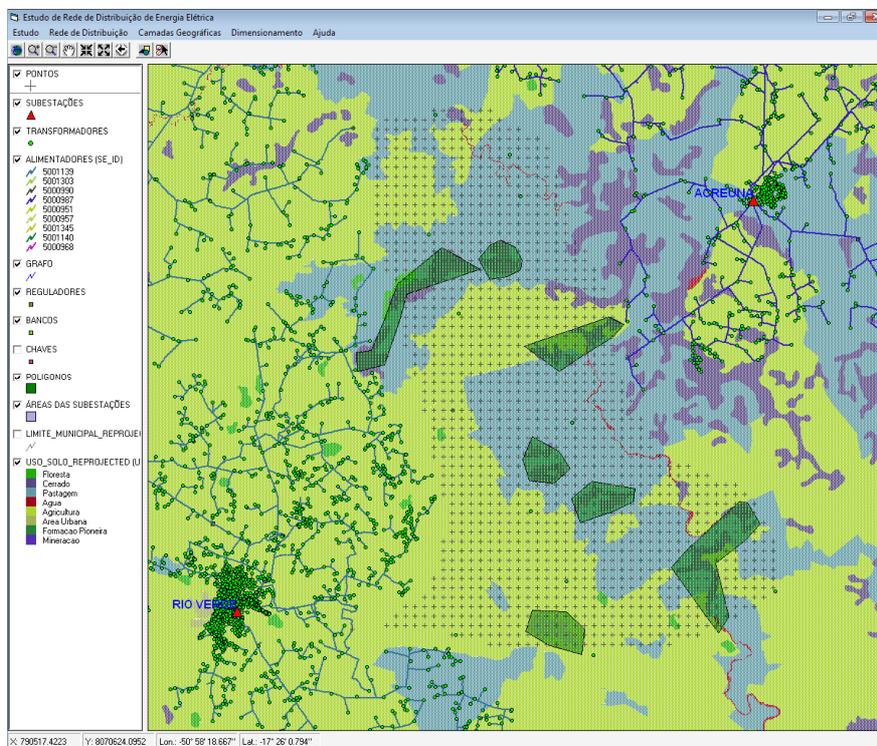


Figura 7. Grade de pontos auxiliares.

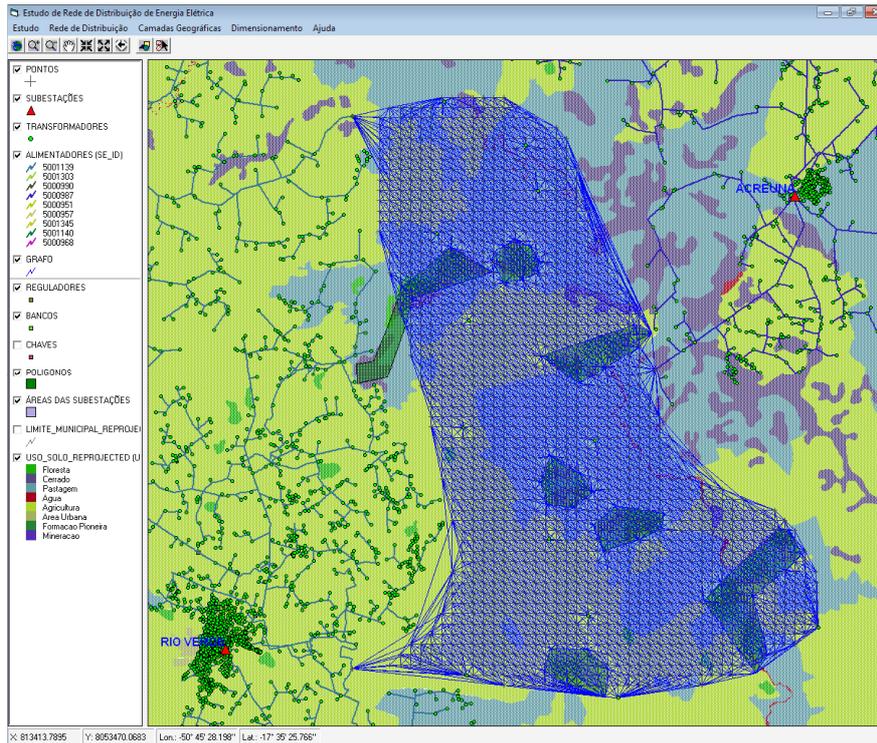


Figura 8. Grafo gerado sobre a grade de pontos auxiliares.

A Figura 9 mostra a solução de encaminhamento obtida sem violações e com um vetor de custos igual a $(C_I, C_P) = (\text{R}\$385.349,40, 284\text{kW})$. A Figura 10 mostra o grafo de encaminhamento com pontos de Torricelli.

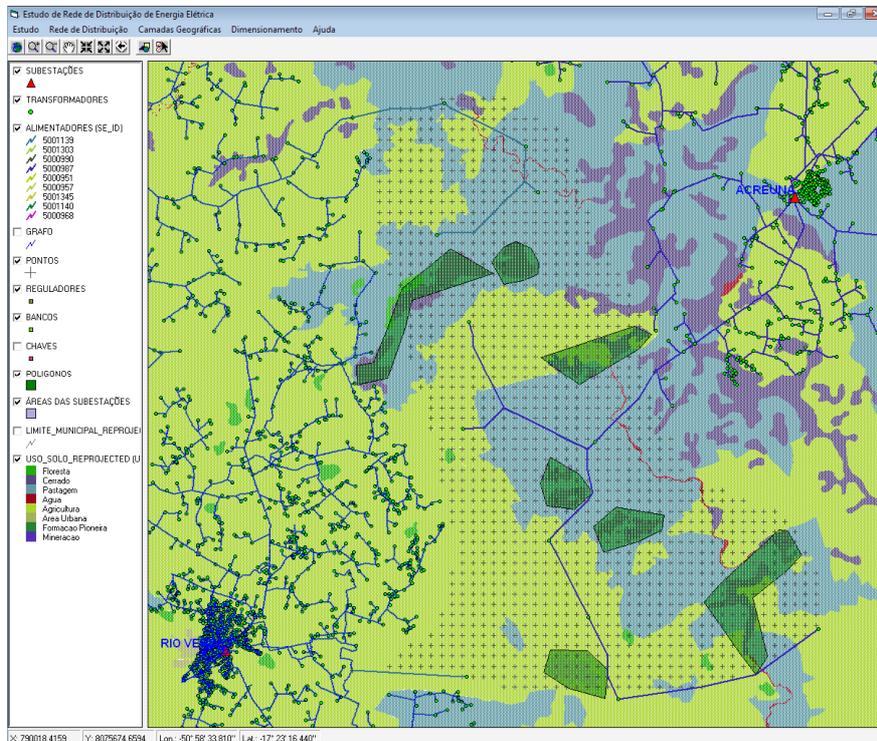


Figura 9. Encaminhamento obtido sobre a grade de pontos auxiliares.

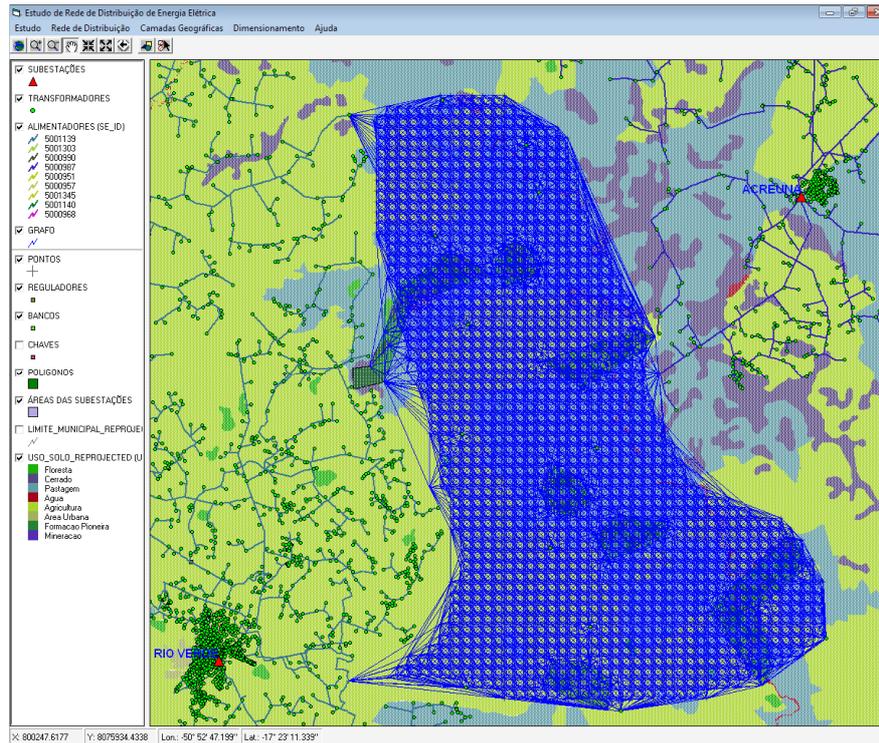


Figura 10. Grafo sobre grade de pontos auxiliares e aplicando-se pontos de Torricelli.

As Imagens 11 e 12 mostram a melhor solução obtida sem violações e com um vetor de custos igual a $(C_I, C_P) = (\text{R}\$376.569,40, 284\text{kW})$.

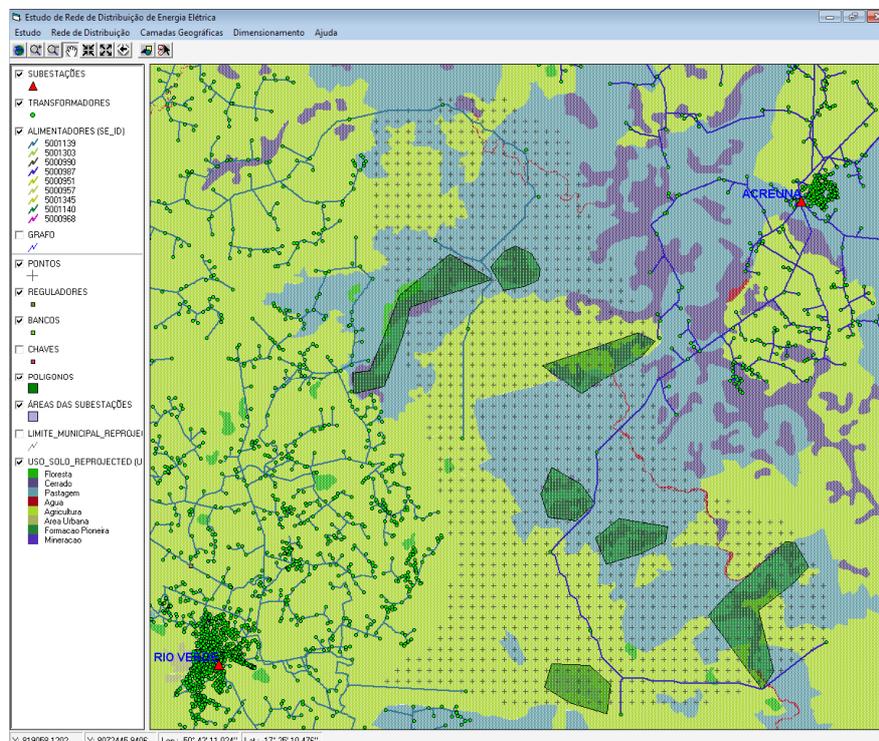


Figura 11. Encaminhamento obtido sobre a grade de pontos auxiliares e pontos de Torricelli.

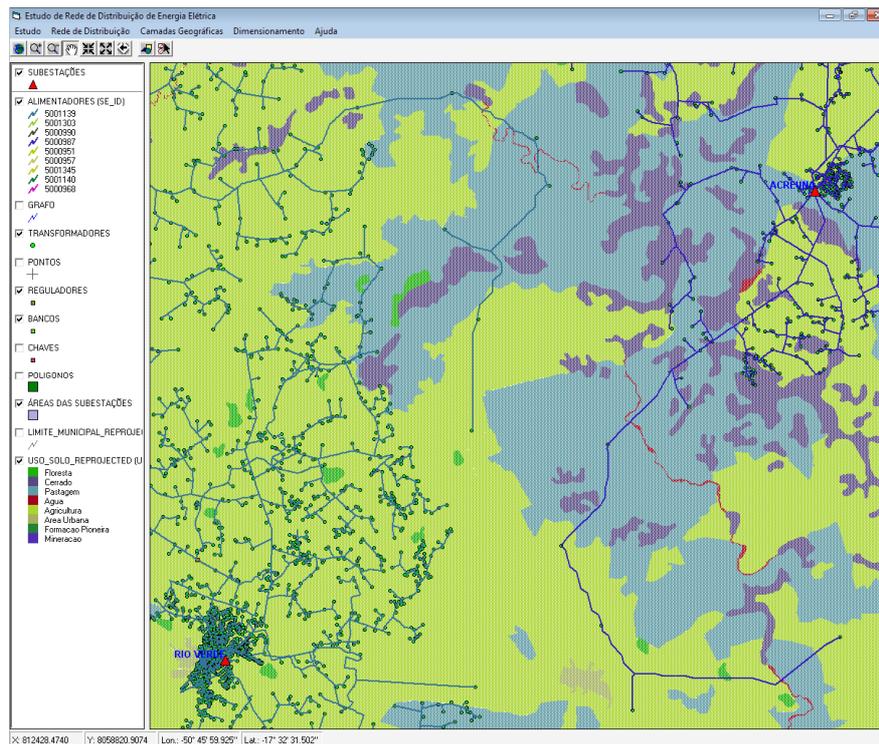


Figura 12. Melhor solução de encaminhamento obtida.

Os resultados mostram que o encaminhamento utilizando uma grade de pontos auxiliares combinado com o Grafo com pontos de Torricelli fornecem melhor resultado, visto que essa configuração apresenta o maior espaço de busca por melhor discretizar o espaço geográfico. Porém, o custo computacional, refletido em tempo de processamento, é maior. Empiricamente, verificou-se que o tempo de processamento cresce quadraticamente com o número de arestas do Grafo. Ademais, tomando o Grafo simples e sem a utilização de pontos auxiliares, o tempo é predominantemente despendido com as simulações para o cálculo de fluxo de potência, ao passo que, com a configuração mais complexa, o tempo é despendido predominantemente com os cálculos de distâncias mínimas entre os vértices do Grafo. (O cálculo de distâncias mínimas é necessário para se encontrar o trajeto entre os pontos tomados no passo 4 do algoritmo de encaminhamento apresentado na seção 2.3.) Cabe-se ressaltar que nesse estudo de caso o objetivo referente às perdas técnicas C_p não foi preponderante na busca das soluções, visto que para as diferentes soluções obtidas este variou na ordem de dezenas de kW, somente, não impactando no progresso da busca multi-objetivo. Os processos foram realizados em um PC desktop Intel Core 2 Duo 2,0GHz, com 3GB de RAM, no sistema operacional Windows XP. Os tempos médios de processamento foram os seguintes: (i) para o grafo de encaminhamento simples, 17 segundos; (ii) para o grafo de encaminhamento com pontos de Torricelli, 25 segundos; (iii) para grafo com grade de pontos auxiliares, 152 segundos; e (iv) para o grafo com grade de pontos auxiliares e pontos de Torricelli, 242 segundos.

4. Conclusões

O presente trabalho apresentou um software dirigido ao planejamento de redes de distribuição de energia elétrica. Neste, foi proposto e implementado um método heurístico multi-objetivo e multi-restrição para o encaminhamento de alimentadores. Os resultados de um estudo de caso mostraram sua eficácia e aplicabilidade.

Como perspectiva futura, pretende-se estender o método aplicando-se a otimização com múltiplos tipos de alimentadores, na qual também serão indicados quais são os melhores tipos de

alimentadores para cada trecho de encaminhamento.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à CELG D pelo suporte financeiro e pelo fornecimento das informações necessárias para a realização deste trabalho.

Referências

- Barber, C. B., D.P. Dobkin, and H.T. Huhdanpaa.**, "The Quickhull Algorithm for Convex Hulls," ACM Transactions on Mathematical Software, Vol. 22, No. 4, Dec. 1996, p. 469-483.
- Boulaxis, N.G., Papadopoulos, M.P.**, Optimal Feeder Routing in Distribution System Planning Using Dynamic Programming Technique and GIS Facilities. IEEE. Trans. on Power Delivery. vol. 17, n. 1, p. 242-247, 2002.
- Falaghi, H., et al.**, Optimal Selection of Conductors in Radial Distribution Systems with Time Varying Load. 18th International Conference on Electricity Distribution. Turin, 6-9, 2005.
- Fozdar, M., Arora, C. M., Gottipati V. R.**, Recent Trends in Intelligent Techniques to Power Systems. 42nd Int. Univ. Power Engineering Conf., UPEC 2007, Jaipur, p. 580-591.
- Grainger, J. J. e Stevenson, W. D.**, Power System Analysis, ISBN 0-07-061293-5. McGraw-Hill Science Engineering, 1994.
- Gómez, J.F., et al.**, Ant Colony System Algorithm for the Planning of Primary Distribution Circuits. IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 19, No.2 , 2004.
- Kiran, W. C and Adler, R. B.**, A distribution system cost model and its application of conductor sizing. IEEE Trans. on PAS, vol. 101, p. 271-275, 1982.
- Michalewicz, Z., Fogel, D.B.**, How to Solve It: Modern Heuristics. 2nd ed., Springer Verlag, 2004.
- Monteiro, C., Ramires-Rosado, I.J., Miranda, V., et. al.**, GIS Spatial Analysis Applied to Electric Line Routing Optimization. IEEE Trans. on Power Delivery. vol. 20, n. 2, p. 934-942, 2005.
- Ranjan, R., Venkatesh, B., e DAS, D.**, A New Algorithm for Power Distribution Systems planning. Journal of Electrical Power Systems Research, vol. 62, n. I, 55-65, 2002.
- Skiena, S. S.**, "Steiner Tree." §8.5.10 in The Algorithm Design Manual. Springer-Verlag, Nova Iorque, 339-342, 1997.