



MÉTODO COMPUTACIONAL PARA O DIMENSIONAMENTO MECÂNICO DE LINHAS AÉREAS RURAIS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Leonardo C. Brito, Denner M. Carvalho, Pedro H. S. Palhares, Cassio L. Ribeiro

Universidade Federal de Goiás

Av. Universitária, n.º 1488, qd. 86, bl. A, 3º piso, Setor Leste Universitário, CEP 74605-010,
Goiânia, Goiás, Brasil
brito@emc.ufg.br

Adson S. Rocha

Instituto Federal Goiano

Av. Wilton Monteiro da Rocha, s/n, Setor Cristina II, CEP 75380-000, Trindade, Goiás, Brasil
adson.rocha@ifgoiano.edu.br

João V. M. Melo

Celg Distribuição

Rua 2, qd. A-37, nº 505, Bairro Jardim Goiás, CEP 74.805-180, Goiânia, Goiás, Brasil
joaovictor.mdm@celg.com.br

RESUMO

Este artigo tem o objetivo de apresentar um método heurístico simples e eficiente dirigido ao dimensionamento mecânico de linhas aéreas rurais de distribuição de energia elétrica. Foi desenvolvido um método heurístico recursivo que varre as linhas que compõem uma rede de distribuição, de modo a avaliá-la e otimizá-la, gerando assim soluções ótimas ou quase-ótimas de dimensionamento. É previsto um incremento considerável de produtividade, bem como a redução de inconsistências e equívocos na elaboração de soluções e potencial redução de custos de investimentos por meio de projetos otimizados a partir da utilização do método computacional proposto. Os resultados obtidos evidenciam a qualidade e praticidade do método proposto.

PALAVRAS CHAVE. Energia Elétrica, Dimensionamento Mecânico, Heurística.

ABSTRACT

This paper aims to present a simple and efficient heuristic method for the mechanical design of rural electricity distribution lines. A recursive heuristic method has been developed. It scans the lines that composes a distribution network in order to evaluate and optimize it, thus generating optimal or quasi-optimal scaling solutions. A considerable increase in productivity is expected, as well as the reduction of inconsistencies and misunderstandings in the elaboration of solutions and potential reduction of investment costs through projects optimized from the use of the proposed computational method. The results obtained evidenced the quality and practicality of the proposed method.

KEYWORDS. Electrical Power, Mechanical Dimensioning, Heuristic.



1. Introdução

Tipicamente, o processo de dimensionamento mecânico de linhas que compõem redes de distribuição de energia elétrica em média tensão, referente a projetos rurais, têm o relevo e os esforços mecânicos como fatores preponderantes para seus projetos, visto que variações significativas das cotas altimétricas ao longo da trajetória de uma linha influenciam na quantidade, nas alturas e nas posições ótimas para as montagens (postes e estruturas) que sustentam os cabos de distribuição de energia, que por suas vezes têm suas flechas determinadas pelas extensões dos vãos entre os postes. Geralmente, tal dimensionamento é realizado manualmente, de forma que o projetista, lançando mão de sua experiência, realiza alocação poste-a-poste no projeto, realizando julgamentos, na maioria das vezes, não aplicáveis ao contexto global da rede projetada, de maneira que não se alcança uma solução ótima [Labegalini 2009]. Comumente, este problema é tão mais incidente quanto maior for o projeto a ser realizado, tomando como métrica, por exemplo, a extensão total da rede e a quantidade de ramificações dessa. De forma a contribuir neste campo, este trabalho propõe o emprego de heurísticas simples, especificamente elaboradas para o auxílio ao dimensionamento mecânico de redes de distribuição de energia elétrica. Tal método se restringe a redes rurais de média tensão e tomou como base as referências [ABNT 1996], [Celg D 1993], [Celg D 2010], [Celg D 2012], [Cepel 2001] e [Copel 1995]. Não é de conhecimento dos autores que existam métodos com o mesmo propósito na literatura, embora existam métodos para a otimização das estruturas que sustentam linhas de transmissão e de distribuição de energia elétrica, tais como [Guo e Li 2011] e [Shea e Smith 2006]. No desenvolvimento apresentado neste artigo, almeja-se otimizar, não as estruturas em si, mas as configurações e posicionamentos das montagens (postes e estruturas de sustentação de cabos), de modo que a solução seja a tecnicamente viável de menor custo financeiro.

Na seção 2, apresenta-se o procedimento de otimização proposto para aplicação na determinação automática da quantidade de montagens, suas configurações e suas posições espaciais. Uma aplicação real do método proposto é mostrada na seção 3. Conclusões gerais são feitas na seção 4.

2. Método de Dimensionamento Mecânico de Redes de Distribuição de Energia Elétrica

O método de dimensionamento proposto é formado pela composição de um método de otimização simples e eficaz associado a um avaliador de soluções propostas ao longo do processo de busca. O avaliador executa tanto o cálculo mecânico, como o cálculo de custo total da proposta de solução.

Quanto ao método de cálculo mecânico, emprega-se um algoritmo de análise mecânica matricial de montagens. São considerados os esforços aplicados às montagens de sustentação pelos cabos, as cargas de ruptura, bem como o vento incidente nas montagens que compõem a rede. Os esforços aplicados pelos cabos são calculados segundo [Labegalini 2009] e as forças e momentos resultantes nas montagens são calculados matricialmente segundo a formulação apresentada em [Williams 2009], obtendo-se resultados tais como o que é exposto na Fig. 1. Com estes resultados e considerando-se também as resistências que estais (cabos de aço galvanizado utilizados para ancorar os postes) aplicados oferecem aos esforços exigidos, as possíveis violações de forças e de momentos mecânicos máximos suportados nos elementos que compõem as montagens, bem como nos cabos, são avaliadas e convertidas em um valor numérico de avaliação, o qual é utilizado para guiar o processo de otimização. Cabe ressaltar que a referida avaliação numérica também é impactada por violações referentes às alturas mínimas cabo-solo que, por norma [Celg D 1993], devem ser respeitadas. Quanto mais se viola esse limite, mais se penaliza a avaliação numérica da proposta de solução. Assim sendo, a parcela de avaliação referente às restrições mecânicas é dada pela soma das violações técnicas impostas.

Quanto ao método de otimização, a seguir são apresentados: o procedimento principal recursivo, o qual permite varrer a rede de distribuição de energia elétrica, iniciando nas terminações da rede e finalizando no seu ponto inicial, pertencente à linha principal; o método para a geração



O procedimento “*Itera_Otimização*” é responsável por prover uma resposta ótima ou quase-ótima, ao variar e avaliar iterativamente as soluções correntes. A variação, denotada por “*Varia_Linha*” corresponde a, primeiramente, escolher aleatoriamente, para cada montagem, se a variação se dará ou por alteração da altura do poste, ou por alteração do tipo de estrutura ou por reposicionamento de um poste, também selecionado aleatoriamente, em uma posição vizinha à corrente, dentro da trajetória pré-estabelecida inicialmente. A altura do poste é variada em ± 1 metro, cada uma com 50% de probabilidade, com a restrição de que o valor esteja dentro do intervalo [7, 12] metros (alturas padronizadas). A posição de cada montagem é variada aleatoriamente aplicando-se uma distribuição gaussiana com média dada pela posição corrente e com desvio-padrão dado por um percentual da distância entre a montagens anterior e posterior à montagem em questão. Assim, a modificação/perturbação na linha é realizada, de forma a se obter uma proposta vizinha à solução corrente.

Trata-se, então, de um algoritmo do tipo *Hill Climbing* ([Engelbrecht 2007], [Michalewicz e Fogel 2004] e [Russel e Norvin 2014], no qual a solução corrente é substituída pela solução vizinha sempre que esta última se mostra melhor. Associado a este algoritmo, foi empregada a “regra do 1/5” [Michalewicz e Fogel 2004] para controlar o passo de variação das posições dos postes, visando convergência mais rápida e robusta. Ou seja, o desvio-padrão supracitado é reduzido ou aumentado de acordo com a “regra do 1/5”. A cada montante pré-definido de iterações do procedimento “*Itera_Otimização*”, a contagem de número de sucessos é efetuada, de forma que, se pelo menos 1/5 das soluções vizinhas geradas forem melhores que os respectivos pontos correntes, o desvio-padrão, utilizado na geração de posições vizinhas das montagens, tem seu valor dobrado; caso contrário, o desvio-padrão é reduzido à metade. Tal procedimento adaptativo permite aumentar a região de busca quando o percentual de sucessos for grande (confere caráter de busca global) e, por outro lado, induz a redução de tal região, enfatizando o refinamento da solução corrente (estimula a busca local).

Procedimento *Otimiza_Linha* (entrada: **Rede**)

Linha \leftarrow *Gera_Solução_Inicial* (**Rede**);

Se **Linha** tem ramais

Para cada **Ramal** da **Linha**

Ramal \leftarrow *Otimiza_Linha* (**Ramal**);

Fim Para

Fim Se

RedeOtimizada \leftarrow *Aloca_Montagens* (**Linha**);

Retorna **RedeOtimizada**

Fim Procedimento

Procedimento *Aloca_Montagens* (entrada: **Linha**)

Linha \leftarrow *Itera_Otimização* (**Linha**);

Se **Linha** está em conformidade

LinhaNova \leftarrow **Linha**;

Enquanto **LinhaNova** está em conformidade

LinhaNova \leftarrow *Remove_Montagem* (**Linha**);

LinhaNova \leftarrow *Itera_Otimização* (**LinhaNova**);

Se **LinhaNova** está em conformidade

Linha \leftarrow **LinhaNova**;

Fim Se

Fim Enquanto

Senão

Enquanto **Linha** não está em conformidade

Linha \leftarrow *Insere_Montagem* (**Linha**);

Linha \leftarrow *Otimiza_Estais*(**Linha**);

Linha \leftarrow *Itera_Otimização* (**Linha**);

Fim Enquanto



Fim Se
Retorna **Linha**
Fim Procedimento

Procedimento *Itera_Otimização* (entrada: **Linha**)

Enquanto condição de parada não é satisfeita
LinhaViz ← *Varia_Linha* (**Linha**);
Se *Avaliação* (**LinhaViz**) < *Avaliação* (**Linha**)
Linha ← **LinhaViz**;

Fim Se
Fim Enquanto
Retorna **Linha**;
Fim Procedimento

Procedimento *Otimiza_Estais* (entrada: **Linha**)

Para cada **Poste** da **Linha**
Estais ← **Poste.Estais**;
Enquanto **Poste** não estiver em conformidade e houver configurações possíveis de
Estais
EstaisViz ← *Varia_Estai*(**Poste**);
Se *Avaliação* (**EstaiViz**) < *Avaliação* (**Estais**)
Poste.Estais ← **EstaisViz**;

Fim Se
Fim Enquanto
Fim Para
Retorna **Linha**;
Fim Procedimento

O procedimento “*Otimiza_Estais*” gera, seguindo uma norma própria [Celg D 1993], uma configuração adequada para os estais de amarração do poste.

Cabe ressaltar que, sempre que uma nova proposta de solução é gerada, efetua-se sua avaliação quantitativa de sua qualidade para que seja possível compará-la a outra. O primeiro critério de comparação é o montante de violação das propostas de solução. O segundo critério, caso nenhuma apresente violações técnicas, é o custo. Ou seja, caso ambas apresentem violações técnicas, a que menos viola é vencedora; caso uma apresente violação e a outra não, vence a segunda; e, caso ambas não apresentem violação técnica, vence a de menor custo.

3. Aplicação do Método Proposto

Com o propósito de exemplificação, o estudo de caso descrito a seguir ilustra a aplicação do método proposto. Trata-se de uma linha principal de distribuição de energia elétrica que apresenta uma derivação (ramificação proveniente da linha principal). Para o estudo, foi utilizado cabo 2/0 CAA [Celg D 1993], em tensão de operação 13,8 kV, que por suas vezes são definidos no planejamento elétrico do atendimento a carga solicitada. Na Fig. 2, apresenta-se o encaminhamento espacial, em vista superior, bem como o perfil correspondente, definido após o cadastramento dos dados de abscissas e cotas altimétricas obtidos em levantamento topográfico. A velocidade do vento adotada neste exemplo foi de 100 km/h.

Foram consideradas 1000 iterações no procedimento “*Itera_Otimização*”, sendo que a “regra do 1/5” foi empregada a cada 10 iterações, de forma a adaptar o desvio-padrão aplicado ao reposicionamento das montagens. Ademais, permitiram-se postes de 10 e 11 metros.

O custo da rede, após o emprego do método “*Gera_Solução_Inicial*”, cujo resultado é apresentado na Fig. 3, é de R\$ 67.420,37. No entanto, esta solução inicial apresentou violação de duas restrições de distância mínima cabo-solo, tanto na linha principal quanto no ramal. Na sequência, o processo iterativo de “*Otimiza_Linha*” foi executado e obteve-se o resultado



apresentado na Fig. 4, cujo custo final foi de R\$ R\$ 67.508,01, um pouco maior que a solução anterior, mas não apresentou violação de restrições técnicas. Ou seja, a aplicação de postes mais altos, porém mais caros, e em quantidade adequada, associado aos seus reposicionamentos, permitiu o atendimento às normas técnicas, tanto do ponto de vista de resistência mecânica, quanto do ponto de vista de altura mínima cabo-solo.

Este procedimento foi repetido 100 vezes e resultados muito semelhantes foram obtidos, com média de R\$ 71.417,21 e desvio-padrão de R\$ 2.205,56, evidenciando a robustez do método.

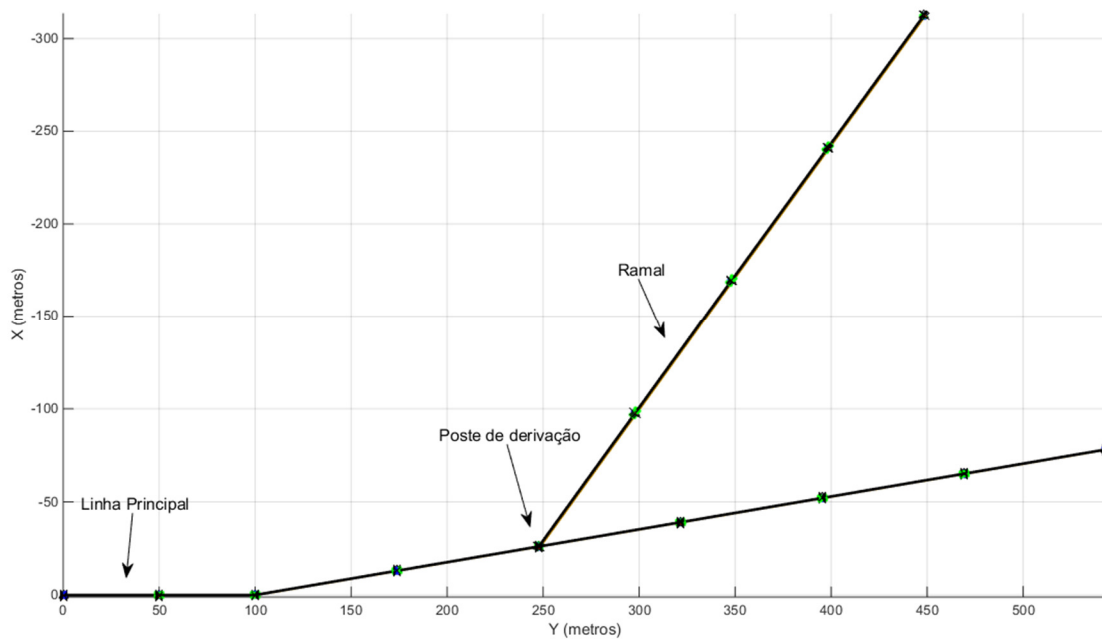


Figura 2. Visão aérea do encaminhamento da linha principal e do ramal. Tipicamente, os trajetos das linhas são pré-definidos.

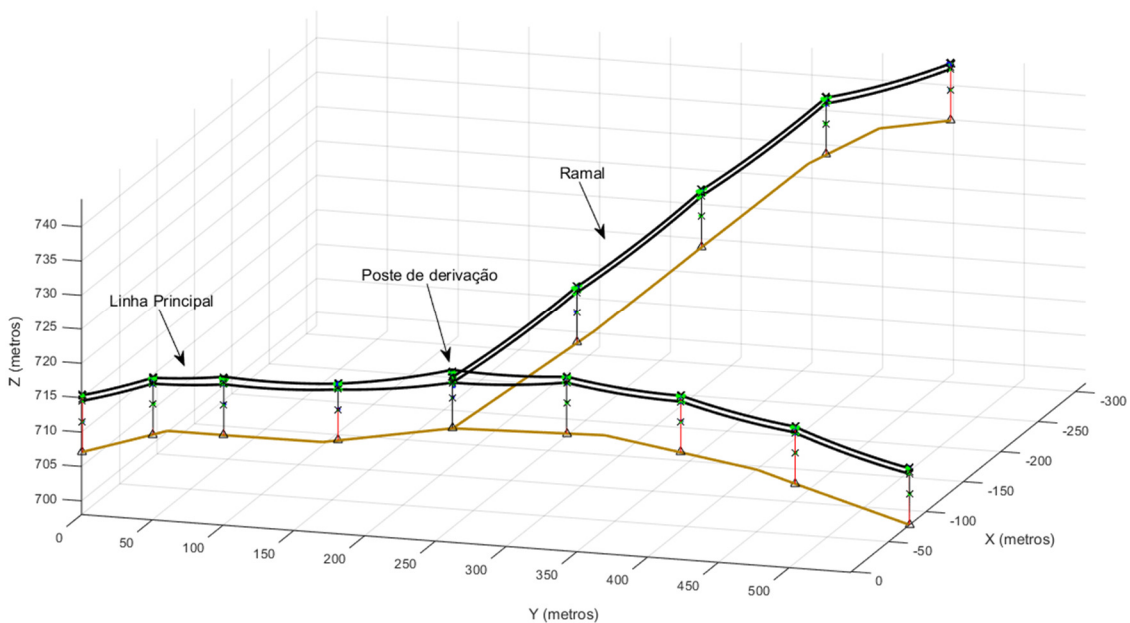


Figura 3. Solução correspondente à distribuição uniforme de montagens, feita empregando-se os vãos típicos referentes aos cabos utilizados.

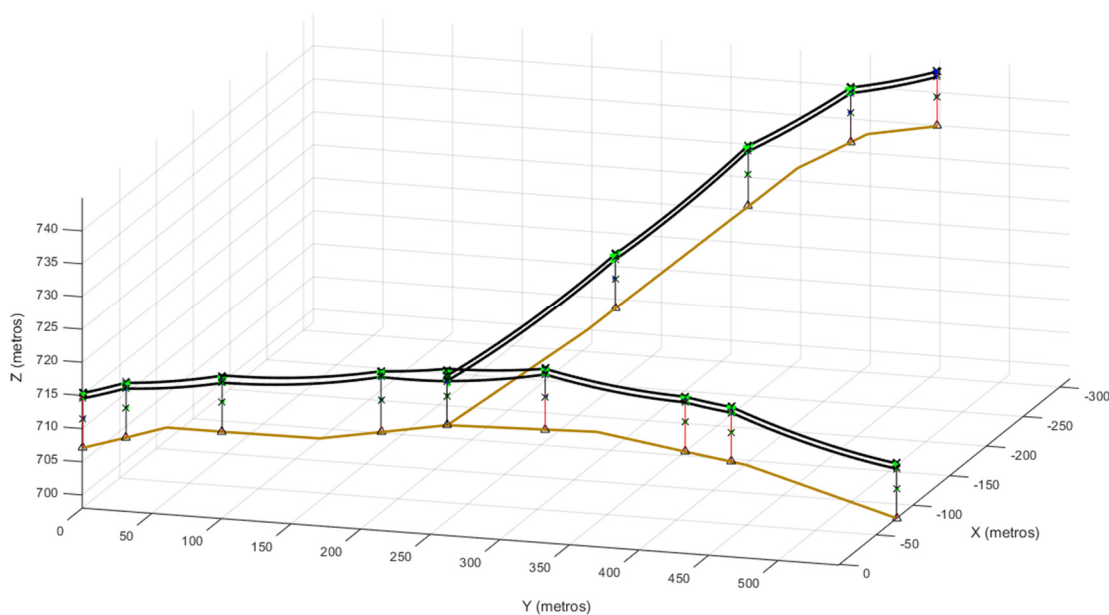


Figura 4. Solução obtida para o problema, com o emprego de postes com alturas e posicionamentos adequados. Nenhuma restrição é violada.

Cabe ressaltar que foi utilizado um PC (*personal computer*) com processador Intel i7 (2,0 GHz de *clock*) de 64 bits e com memória RAM de 8 GB, com o qual se obteve um tempo médio de avaliação de cada proposta de solução de aproximadamente 25 milissegundos, exigindo um total de cerca de 2,6 minutos para a otimização da linha deste caso de estudo.

Neste primeiro caso, o especialista foi capaz de encontrar uma solução semelhante, a custo aproximadamente igual, porém dedicando um tempo total de aproximadamente 35 minutos no dimensionamento da solução. Ressalta-se que o especialista utilizou as funcionalidades de edição (inclusão, remoção e alteração dos valores dos parâmetros das montagens) da ferramenta computacional visual que foi implementada neste trabalho. Este resultado evidencia que o emprego do método proposto, o qual foi implementado em software, permitirá um aumento de produtividade considerável, dado o montante diário de projetos deste tipo que são gerados ou analisados em uma concessionária de distribuição de energia elétrica.

O segundo caso de aplicação corresponde ao dimensionamento automático de uma única linha de distribuição de energia elétrica. Também foi utilizado cabo 2/0 CAA [Celg D 1993], em tensão de operação 34,5 kV. Na Fig. 5, apresenta-se o encaminhamento espacial, em vista superior.

A velocidade do vento adotada neste exemplo foi novamente de 100 km/h. Os mesmos valores para os parâmetros de otimização do caso anterior foram adotados.

No caso em que se efetuou apenas a distribuição uniforme de postes ao longo da linha, adotando o vão típico quando do emprego do referido cabo de alimentação, o custo total foi de R\$ 93.373,81, mas esta apresentou violação da altura mínima cabo-solo exigida, mesmo com a alocação de 15 montagens, como pode ser visto na Fig. 6.

Após a otimização, com o reposicionamento das montagens, obteve-se a solução mostrada na Fig. 7. O custo final é de R\$ 91.176,00, menor que o custo inicial, porém como o atendimento completo das restrições técnicas. Pode-se perceber, na Fig. 6, que o método é capaz de alocar as montagens se aproveitando das características do relevo, o que permitiu reduzir em uma unidade o número de montagens necessárias para atender às exigências técnicas.



Figura 5. Encaminhamento com relevo irregular.

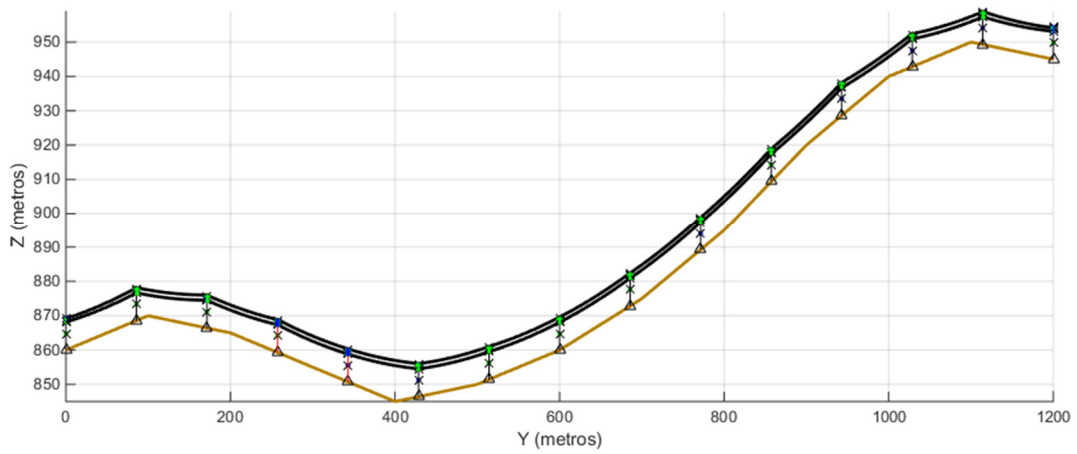


Figura 6. Proposta de solução com distribuição uniforme de montagens (15 montagens).

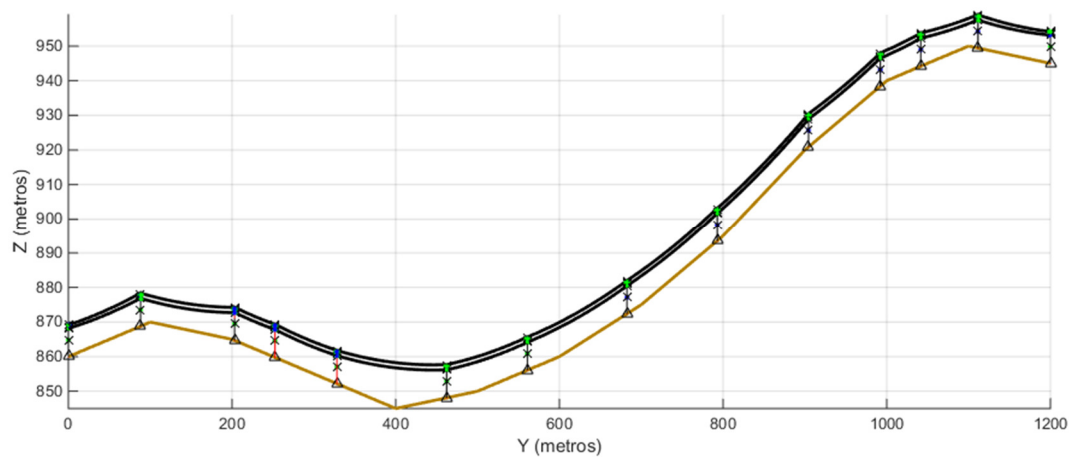


Figura 7. Solução encontrada para a linha em terreno irregular (14 montagens).



Neste caso, o tempo médio de avaliação de uma solução foi de 27 milissegundos, totalizando um tempo de otimização de 2,9 minutos. Cabe ressaltar que o tempo para otimização varia de caso para caso de aplicação em função da complexidade da rede, bem como devido ao número de iterações necessárias para se encontrarem linhas que estejam em conformidade técnica ao se inserirem ou removerem montagens (vide procedimento “*Aloca_Montagens*”). Neste caso, o especialista encontrou uma solução com um custo superior, por empregar um poste a mais que na solução obtida por meio do processo de otimização, dedicando-se o dimensionamento manual por cerca de 30 minutos.

4. Conclusões

Os empregos de técnicas de Pesquisa Operacional e, mais especificamente, de métodos de otimização computacional, têm o potencial de aumentar a velocidade e a praticidade para a obtenção de soluções de alta qualidade para problemas reais. Dentro desse escopo, o método apresentado neste artigo permitirá o incremento da produtividade quanto ao dimensionamento de redes rurais de distribuição de energia elétrica, bem como potencializará a geração de soluções tecnicamente robustas e de menor custo. A utilização deste método em uma ferramenta computacional dirigida ao planejamento técnico do encaminhamento de rede de distribuição de energia elétrica possibilitará ao Engenheiro oferecer ao profissional de campo uma proposta técnica de encaminhamento e posteriormente analisar os serviços de topografia realizados, fazendo comparações o que foi proposto e o que foi executado. Ter uma estimativa de materiais através de projeto com base no perfil planialtimétrico proporciona maior assertividade e assim possibilita mitigar erros nas aquisições de materiais. Os resultados preliminares indicam que a abordagem proposta, dada sua generalidade e potencial para gerar soluções satisfatórias, pode ser estendida para outros tipos de rede, tal como a rede de transmissão de energia elétrica em alta tensão. Cabe ressaltar que o método proposto foi empregado em vários outros cenários reais e apresentou soluções também satisfatórias quanto ao custo e à qualidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e à CELG Distribuição pelo apoio técnico e financeiro.

Referências

- ABNT (1996). NBR 5422. Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica.
- Celg D (1993). Norma Técnica de Distribuição NTD-07 – Critérios de Projetos de Redes de Distribuição Rural.
- Celg D (2010). Norma Técnica NTC-64 – Simbologia para Projetos de Redes de Distribuição de Energia Elétrica Urbanas e Rurais.
- Celg D (2012). Norma Técnica de Distribuição NTD-06 – Estruturas para Redes de Distribuição Aéreas Rurais – Classes 15 e 36,2 kV.
- Cepel (2001). Dimensionamento Mecânico de Redes Elétricas Rurais (Versão 1.0).
- Copel (1995). Dimensionamento de Estruturas.
- Engelbrecht, A. (2007). Computational Intelligence, 2ª ed., Wiley.



Guo, H. Y. e Li, Z. L. (2011). Structural topology optimization of high-voltage transmission tower with discrete variables, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Junho, Vol. 43, Ed. 6, pág. 851–861.

Labegalini, P. R. (2009). *Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão*, 2ª ed., ed. Edgard Blücher.

Michalewicz Z. e Fogel, D. (2004). *How to Solve It: Modern Heuristics*. 2ª ed., Springer.

Russel, S. e Norvin P. (2014). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 3ª ed., Pearson.

Shea, K. e Smith, I. F. C. (2006). Improving Full-Scale Transmission Tower Design through Topology and Shape Optimization. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 132, No. 5, pp 781-790.

Williams, A. (2009). *Structural Analysis: In Theory and Practice*, Elsevier.