

SENDI 2004

XVI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Alocação de Bancos de Capacitores em Alimentadores de Distribuição Utilizando Função Objetivo Multicritério para Redução de Perdas e Minimização de Desvios de Tensão e Redução de Custos

E. M. Amazonas Filho¹, U. H. Bezerra¹, Gastão Jucá² e Mauro Ricardo Reis

¹Universidade Federal do Pará, ²Centrais Elétricas do Pará

¹nesc@ufpa.br, ²gastao.juca@redecelpa.com.br

Palavras-chave: Alocação de Bancos de Capacitores, Planejamento de Redes de Distribuição de Energia Elétrica, Minimização de Custos

Resumo: O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma técnica inteligente para avaliar a alocação de bancos de capacitores (ABC) nos alimentadores de distribuição de energia elétrica. A ABC apresenta um alto grau de complexidade na busca da solução ótima devido a natureza combinatória do problema. A técnica adotada, Algoritmo Genético (AG), é adequada na busca da solução ótima, visto que o AG é flexível no tratamento de problemas multi-objetivos e com características discretas. O AG possui um paralelismo implícito baseado no conjunto de soluções denominado população e que está sujeita a um processo evolutivo. Todas as soluções propostas pelo AG são avaliadas fazendo uso de um programa de fluxo de carga para calcular as tensões e perdas ativas nos alimentadores e posteriormente calcula-se uma função custo com multi-objetivos. Com o AG, o planejador da rede de distribuição pode definir quais conjuntos de objetivos deseja otimizar, ou seja, minimizar os custos da compra de bancos de capacitores associados às quedas de tensões; ou minimizar os custos da compra de bancos de capacitores associados às perdas ativas; ou mesmo minimizar todos os custos envolvidos. Os resultados das simulações foram obtidos utilizando os dados de um alimentador da rede de distribuição de energia elétrica de Belém fornecidos pelas Centrais Elétricas do Pará.

1. INTRODUÇÃO

O problema da alocação ótima dos capacitores implica determinar as localizações, os dimensionamentos e o número de capacitores a serem instalados no sistema de distribuição, tal que, o máximo de benefícios sejam alcançados enquanto todas as restrições operacionais sejam satisfeitas para diferentes níveis de carregamento.

As técnicas para solucionar o problema da alocação de capacitores podem ser classificadas dentro de quatro categorias: analítica, programação numérica, heurística e inteligência artificial.

Os pioneiros no problema foram (Neagle & Samson, 1956) que usaram métodos analíticos para a maximização das funções custos que envolviam a economia de energia, a redução das perdas ativas e custo da instalação dos capacitores. A referência (Dwyer, 1992), apresenta um método analítico bastante difundido, inclusive nas concessionárias, a “Regra dos dois terços”, fundamentando-se em suposições não realísticas como condutor com secção constante e carregamento uniforme.

A popularidade dos métodos baseados em inteligência artificial conduziu muitos pesquisadores a investigarem seu uso em aplicações para sistemas de potência. Em particular: algoritmo genético (AG) com (Boone & Chiang, 1993), (Sundhararajan & Pahwa, 1994), (Amazonas, 2003), (Amazonas & Bezerra, 2004); *simulated annealing* (SA) (Ananthapadmanabha et al, 1994); enxame de partículas (Miranda & Fonseca, 2002); sistemas especialistas (SE's) (Ng, et al, 2000.); redes neurais artificiais (RNA's) (Santoso & Tan) e a teoria do conjunto difuso (TCD) (Ng, et al., 1998) têm sido implementados no problema da alocação ótima dos capacitores.

Nos tópicos a seguir serão descritos os conceitos referentes ao problema de alocação de bancos de capacitores, bem como a ferramenta adotada para a solução do problema: o Algoritmo Genético.

Os resultados foram obtidos a partir da aplicação do AG em conformidade com dados reais obtidos de um alimentador de distribuição da concessionária CELPA. Neste artigo, será possível avaliar a capacidade do AG na busca de uma solução para os planejadores dos sistemas de distribuição de acordo com critérios – minimização de custos, perdas e/ou quedas de tensões – e cenários – carga leve, média ou pesada.

2. Definição do Problema de Alocação e Dimensionamento de Banco de Capacitores (PABC)

O problema de Alocação de Banco de Capacitores caracteriza-se por sua natureza combinatória. Os alimentadores das redes de distribuição de grande porte podem possuir milhares de nós elétricos e dezenas de quilômetros de comprimento, acrescentando-se a isto, há vários dimensionamentos de bancos de capacitores que podem variar de 150 kVAr a 1200 kVAr em redes de 15 kV.

Suponha o alimentador de forma uniforme, tal como mostrado na figura 1.

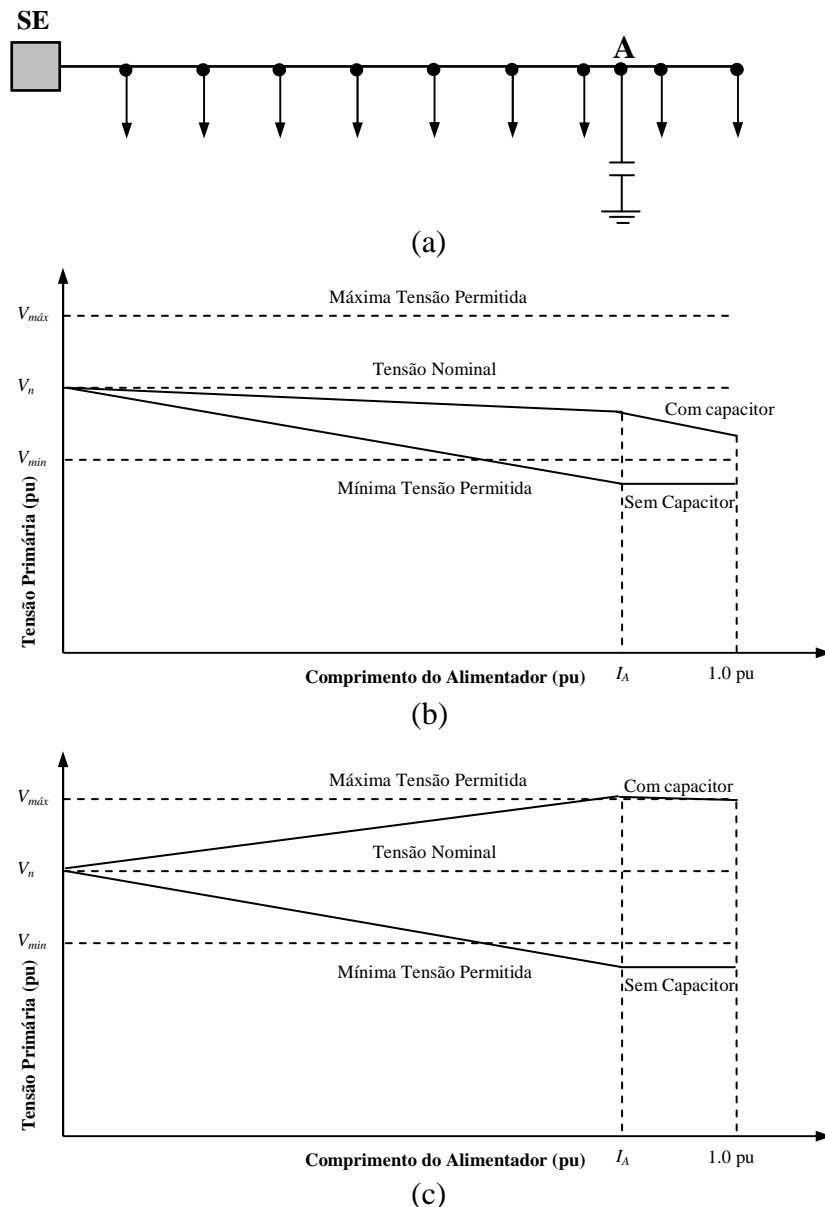


Figura 1 – Localização de bancos de capacitores: (a) Localização física, (b) Perfil de tensão com carregamento pesado e (c) Perfil de tensão com carregamento leve.

Observa-se que para diferentes perfis de carregamento o alimentador comporta-se de maneira diferente quanto ao perfil de tensão exibido. A instalação de capacitores fixos, durante períodos de carga pesada, pode inclusive implicar uma sobretensão em períodos de carga leve. A solução para esse tipo de problema é a instalação de capacitores chaveados, ou seja, capacitores com estágios discretos de compensação reativa para serem operados conforme o carregamento do alimentador. Para a instalação de capacitores chaveados é necessário um estudo sobre a demanda reativa diária, a partir da qual pode-se determinar o valor dos estágios fixos e chaveados.

3. Metodologia Adotada: Algoritmo Genético

O AG caracteriza-se por um algoritmo de busca estocástica baseado em heurísticas inspiradas nos mecanismos naturais da genética dos seres vivos. As variáveis do problema devem ser codificadas usando cromossomos artificiais (*strings*), geralmente estruturados como vetores binários, de tal forma que o AG possa manipulá-los. Cada cromossomo representa um ponto de busca no espaço de

soluções, sendo denominado de indivíduo. O AG trabalha com uma população de indivíduos e a cada ciclo esses indivíduos passam por processos de seleção e sofrem a ação de operadores genéticos de mutação e *crossover*, como ilustrados nas figuras 2 e 3, todos estes de caráter aleatório, produzindo-se então uma nova geração de indivíduos.

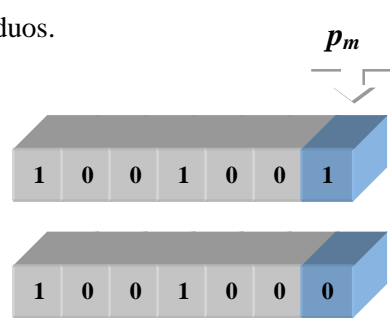


Figura 2 – Operação de Mutação.

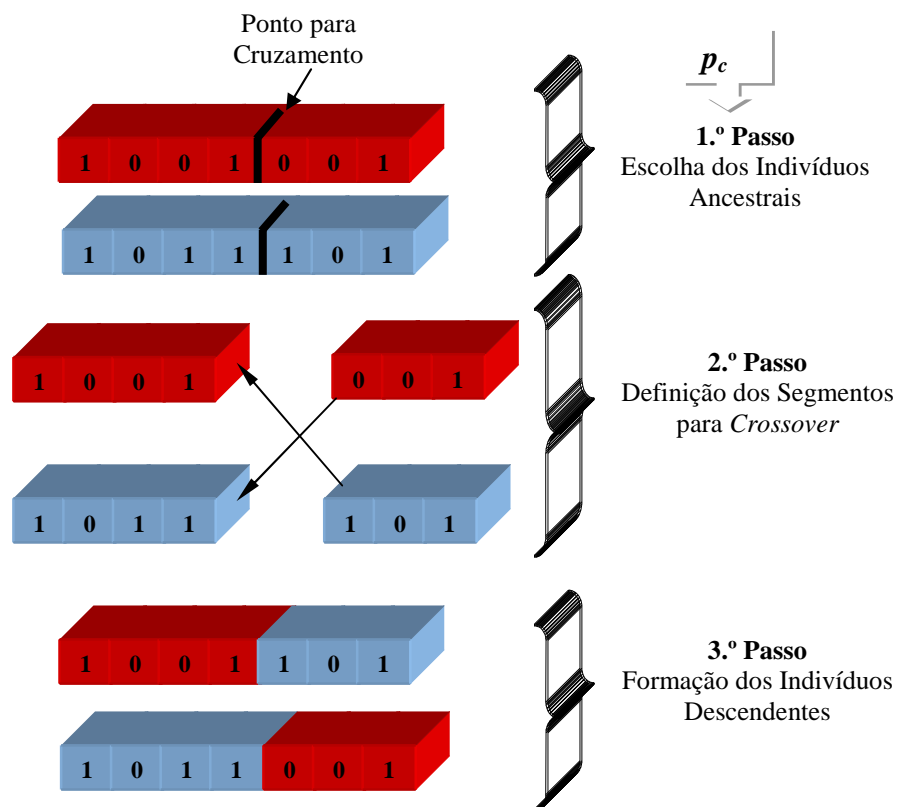


Figura 3 – Operação de *Crossover*

O processo de seleção é polarizado de tal forma a privilegiar a sobrevivência das melhores soluções disponíveis até o presente. Os operadores de *crossover* e mutação são responsáveis pelo intercâmbio de informações entre os indivíduos e pela exploração do espaço de busca. A ação dos mecanismos de seleção, *crossover* e mutação sobre a população, permite a descoberta e replicação de conjuntos de bits importantes ou blocos construtores, que se reunidos em um ou mais indivíduos, em posições apropriadas, produzem soluções bem mais adaptadas. De fato, embora trabalhando sobre uma população finita, conjectura-se que o AG avalia a cada geração, de modo implícito e em paralelo, um número formidável de planos para blocos construtores. Tal propriedade de paralelismo implícito é o único caso conhecido de explosão combinatória a favor. É justamente esta propriedade que torna o AG interessante para o tratamento de problemas complexos.

4. Solução do PABC usando Algoritmo Genético

Para a solução do PABC implementaram-se três funções de *fitness*. A primeira função define os custos devidos às perdas ativas. A segunda função representa os custos com a compra dos bancos de capacitores conforme o orçamento da concessionária e a última função os desvios de tensão.

4.1. A Função Fitness Total

Com o objetivo de implementar uma estratégia de alocação e dimensionamento dos bancos de capacitores determinou-se a Função Fitness Total, equação 1, que compreendeu as três funções de *fitness*.

$$\min \mathfrak{S} = k_p \times C_L + k_c \times C_{ccf} + k_v \times C_v \quad (1)$$

sujeita aos:

- Balanços de potência ativa e reativa descritas pelo conjunto de equações de fluxo de carga, i.e., garantir a convergência do Fluxo de Carga;
- As restrições operacionais referentes as tensões nos nós e nos ramos dos alimentadores;

Em que:

k_p, k_c e k_v : são fatores de penalidades

C_p, C_{cc} e C_v : são as funções custos parciais associadas aos custos com as perdas ativas, compra de bancos de capacitores e desvios de tensões.

4.2. Função de Fitness do Custo de Capacitores

Considerando que as concessionárias utilizem bancos de capacitores com dimensionamentos entre 150 kVAr e 1.200 kVAr, os custos aproximados de cada banco de capacitores podem ser definidos como na tabela 1.

Tabela 1 - Custos e dimensionamento dos Bancos de Capacitores

Dimensionamento dos BC's (kVAr)	Custos dos BC's (U\$\$)
150	1.198,00
300	1.283,00
450	1.296,00
600	1.458,00
900	2.040,00
1200	2.364,00

A Função Custo de Capacitores foi formulada como descrita na equação (2).

$$\text{Função Custo Capacitore } s = \left(\sum_{k=1}^n C_p(k) - C_b \right)^2 \quad (2)$$

em que,

C_p : Custo do k banco de capacitores instalado no n nó do alimentador. Este custo foi definido como na tabela 1.

C_b : O orçamento da concessionária disponível para a compra de bancos de capacitores.

N : Número de bancos de capacitores que serão instalados

4.3. Função de Fitness do Custo das Perdas Ativas

Esta função é representada pelas perdas ativas do sistema que são obtidas pela soma das perdas

ativas em cada um dos ramos dos alimentadores, tal como observado na equação (3).

$$C_L = \sum_{NB} G_{ij} \cdot (V_i^2 + V_j^2) - 2 \cdot G_{ij} \cdot V_i \cdot V_j \cdot \cos(\theta_{ij}) \quad (3)$$

em que,

V : tensão nos nós elétricos i (ou j)

G_{ij} : condutância série no ramo i - j

θ_{ij} : diferença angular entre as tensões dos nós i e j

4.4. Função de Fitness do Custo dos Desvios das Tensões

As concessionárias de energia elétrica precisam manter um nível adequado para os desvios das tensões ao longo dos alimentadores.

A função custo que compreende os desvios de tensões é descrita na equação (4).

$$C_v = \sum_{k=1}^n \left(\frac{V_i - V_i^{spec}}{\Delta V_i^{max}} \right)^2 \quad (4)$$

em que,

V_i : é a magnitude de tensão no nó i

V_i^{spec} : é a magnitude da tensão especificada no nó i

ΔV_i^{max} : é o máximo desvio de tensão no nó i

4.5. Representação Utilizada no PABC

No AG é necessário que a solução do problema seja codificada. A solução codificada é chamada de *string* (ou indivíduo, ou gene, ou cromossomo). Neste artigo, a solução do PABC foi codificada através de *strings* binárias. A *string* consiste de duas partes tal como apresentado na Figura 4. A primeira parte representa os nós elétricos e a segunda parte representa o dimensionamento do banco de capacitor que será instalado no respectivo nó. O comprimento da *string* é variado de acordo com o número de nós elétricos do alimentador e o número de capacitores que serão instalados.

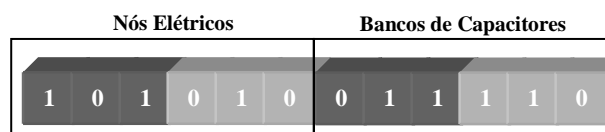


Figura 4 - Representação Binária para o PABC

Devido às operações genéticas (*crossover* e *mutação*) é possível que o AG proponha soluções inviáveis. Conseqüentemente, torna-se necessário avaliar a viabilidade de cada solução e corrigi-las quando necessário.

4.6. Geração de uma população inicial de indivíduos

Um processo aleatório cria cada uma das *strings* binárias da população inicial. Os *bits* de cada *string* é gerado simulando um arremesso de moeda (*flip coin*), i.e., um número aleatório é gerado, se o número é maior que 0.5, então adota-se o *bit* '1', caso contrário o *bit* '0'.

4.7. Avaliação e seleção dos indivíduos no PABC

Os *fitness* dos indivíduos são calculados conforme a Função Fitness Total descrita em na equação

(1). De acordo com os fatores de penalidades, o AG é capaz de minimizar custos específicos: perdas ativas, desvios de tensão e/ou custos dos capacitores; ou os custos de uma forma geral.

A seleção dos indivíduos mais aptos é executada através de um torneio binário.

4.8. Aplicação dos operadores genéticos no PABC

Foram utilizados os operadores genéticos, o *crossover* simples de um ponto ou *crossover* de 2 pontos e o operador mutação.

Depois das operações genéticas, torna-se necessário avaliar a viabilidade de cada solução proposta pelos indivíduos da população.

5. Resultados Obtidos com o AG no PABC

Os resultados das simulações foram obtidos a partir de um alimentador da CELPA com 244 nós elétricos, com um carregamento de 5.892 kW e 2.241 kVAr. O AG foi simulado com uma população de 30 indivíduos, probabilidade de *crossover* igual a 0,7 e probabilidade de mutação 0,005 ao longo de 2000 gerações e com o máximo de 3 (três) bancos de capacitores a serem instalados (Amazonas, 2003).

A primeira simulação teve como objetivo a minimização das perdas ativas. Com relação à Função Fitness Total significa que somente a função custo referente à C_L foi considerada. Neste estudo, também foram descartados os custos com os bancos de capacitores.

Os resultados obtidos foram: potência ativa igual a 370.27 kW com um custo de US\$ 7.092,00 para instalar 3 bancos de capacitores de 1.200 kVAr. Na Figura 5 observam-se as localizações propostas pelo AG para a instalação de bancos de capacitores. Nesta figura apenas uma parte do alimentador – em preto – é apresentada e em verde são os postes adotados como nós elétricos. Os círculos vermelhos indicam a solução encontrada pelo AG, o retângulo em azul indica as regiões em que o AG encontrou mais soluções e o retângulo em preto indica os atuais locais dos bancos de capacitores.

É importante salientar, observando a figura 5, que neste caso no qual o objetivo foi minimizar as perdas ativas do alimentador, o AG sugeriu que os bancos de capacitores sejam instalados em locais próximos no centro do alimentador.¹⁴

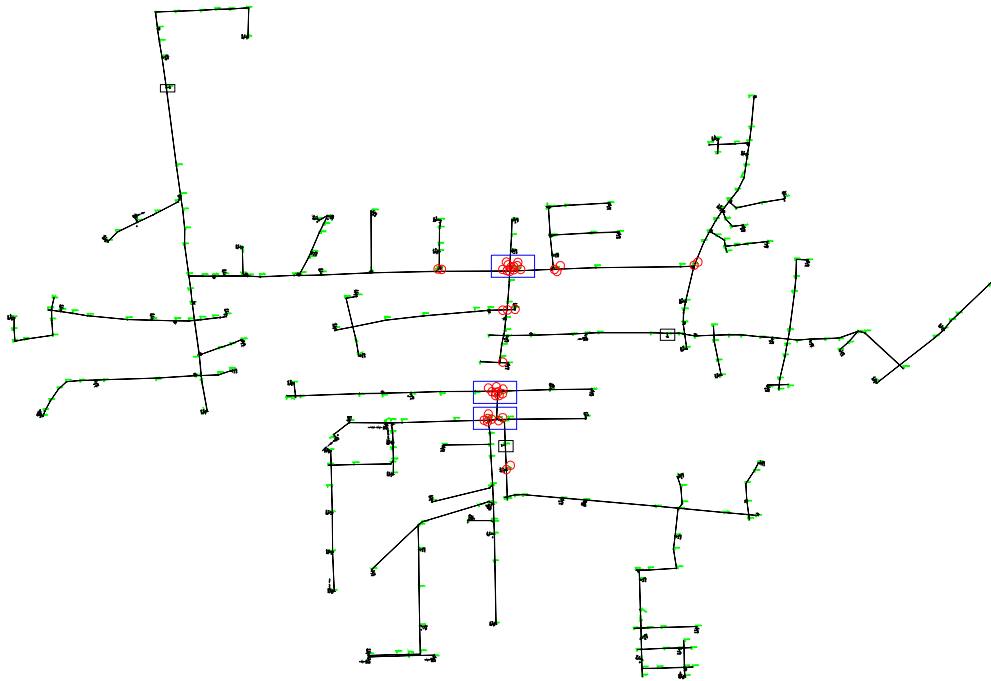


Figura 5 - Localizações Físicas dos Bancos de Capacitores com a Minimização das Perdas Ativas

Como o único objetivo é a minimização de perdas ativas o Fitness Total exhibe um decrescimento tal como a função de *fitness* das perdas ativas até atingir a convergência. Pode-se observar que apesar da função de *fitness* relativa às quedas de tensões não estar presente na Função de Fitness Total, mesmo assim ainda houve uma minimização conforme observado na Figura 6.

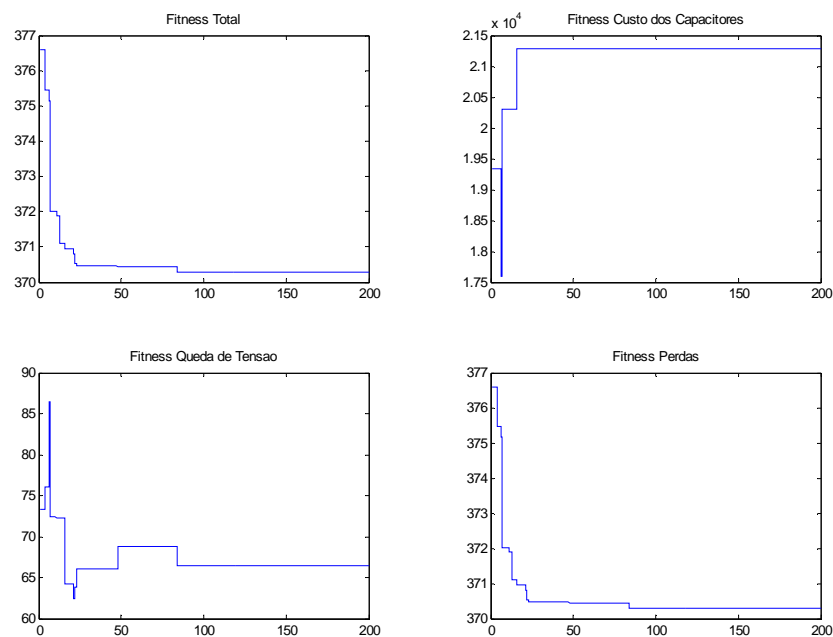


Figura 6 - Processo Evolutivo do AG na Minimização das Perdas Ativas

A Figura 7 apresenta gráficos comparativos dos perfis de tensão, em que o gráfico superior indica a solução obtida pelo AG e o gráfico inferior é condição real das tensões ao longo do alimentador. Observa-se uma recuperação geral no nível das tensões ao longo do alimentador, com a solução obtida no AG.

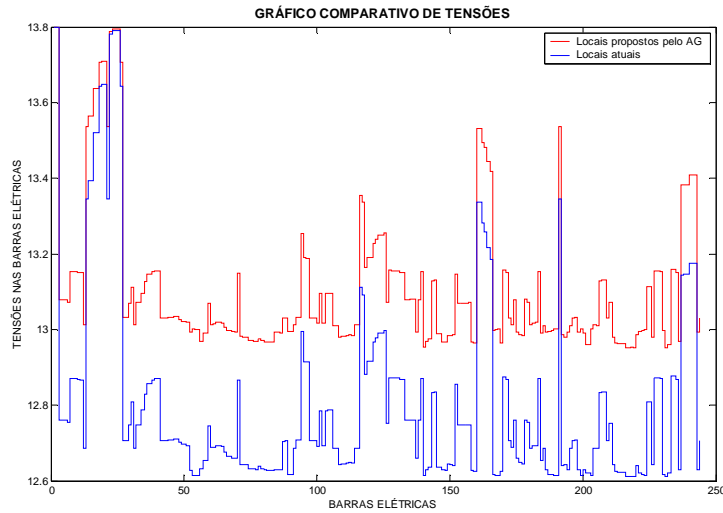


Figura 7 - Perfil de Tensão na Minimização das Perdas Ativas

A segunda simulação envolve a minimização da queda de tensão ao longo do alimentador. Desprezou-se o custo com os capacitores, ou seja, orçamento da concessionária ilimitado e considerou-se a instalação de 3 bancos de capacitores. Os resultados obtidos foram: perda ativa total igual a 411,013 kW e C_t igual a 40.75, com um custo de US\$ 7,092.00. Como se previa pelo fato de não se ter imposto restrição no orçamento para a compra dos bancos de capacitores, o AG buscou as instalações de bancos de capacitores nos seus mais altos valores de compensação reativa, ou seja, 3 (três) bancos de capacitores de 1200 kVAr. A figura 8 mostra o processo evolutivo do AG e a figura 9 o perfil de tensão nos nós elétricos antes (no gráfico inferior) e após (no gráfico superior) a implementação da solução proposta pelo AG, sendo evidente a melhor qualidade da solução proposta pelo AG.

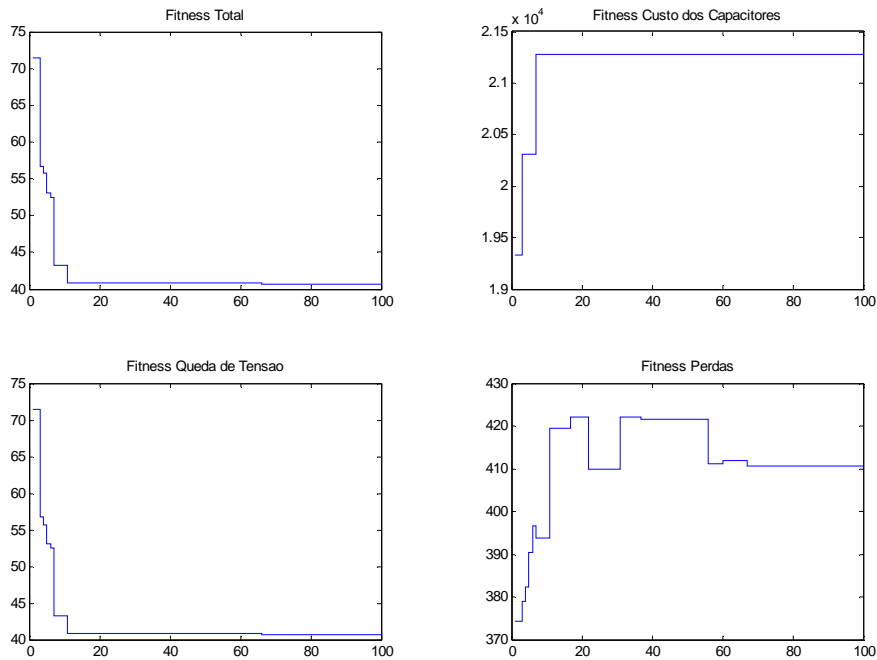


Figura 8 – Processo evolutivo do AG na minimização das quedas de tensões

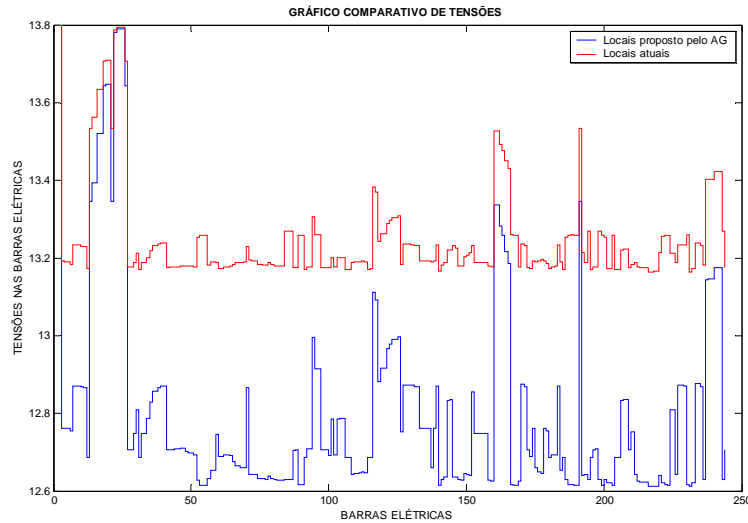


Figura 9 – Perfil de tensão nos nós elétricos do alimentador com minimização das quedas de tensões

A figura 10 apresenta os resultados relativos à localização dos bancos de capacitores (em vermelho), sugeridos pelo AG. Nota-se neste caso, diferentemente do caso anterior, que quando o objetivo é a minimização dos desvios de tensão ao longo do alimentador, o AG sugere que os bancos sejam localizados nos pontos terminais do alimentador.

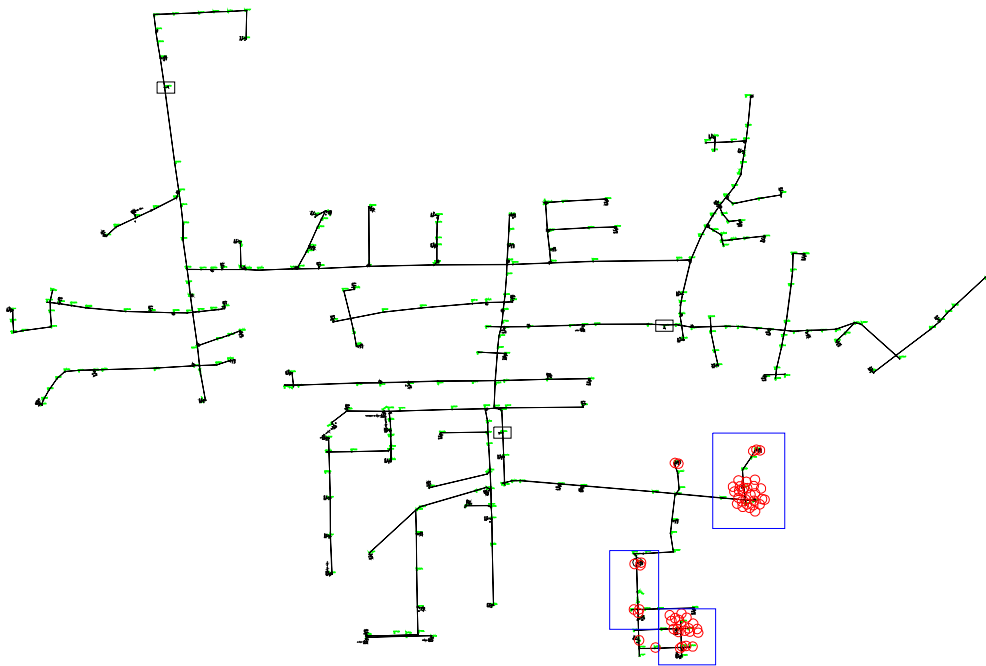


Figura 10 – Localização física dos bancos de capacitores com a minimização das quedas de tensões

A simulação a seguir envolve a minimização da função objetivo total, ou seja, os custos associados aos capacitores, as perdas ativas e as quedas de tensões. O orçamento previsto para compra de capacitores foi estabelecido como sendo de US\$ 4,375.00 que equivale à compra de três capacitores de 600 kVAr. Os resultados obtidos com 20 simulações foram em média: perda ativa de 383,99 kW e C_t igual a 110 e custo de US\$ 4,404.00.

As localizações para a instalação de bancos de capacitores encontradas podem ser observadas na figura 11.

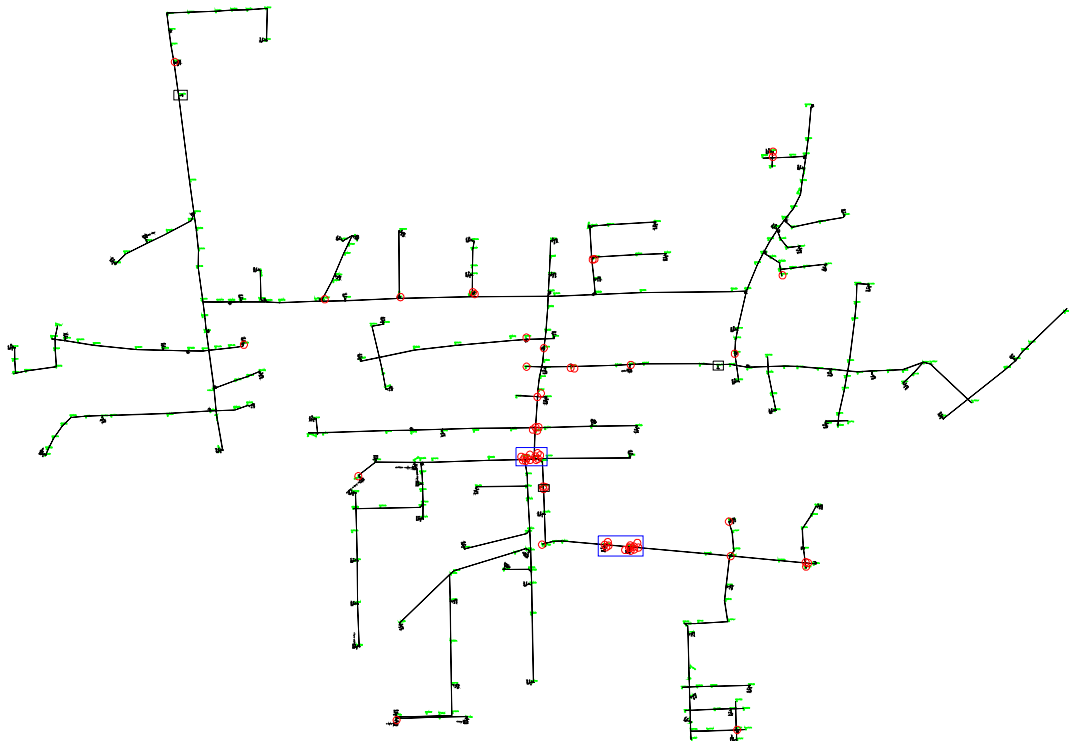


Figura 11 – Localização física dos bancos de capacitores com a minimização função objetivo total

Os perfis de tensão ao longo do alimentador ficaram em situação intermediária entre as soluções apresentadas na figura 7 (minimização das perdas) e na figura 9 (minimização das quedas de tensão). Nota-se que o AG sugere a instalação em locais intermediários, entre o meio do alimentador e os pontos terminais.

6. Conclusões

Apresentou-se uma abordagem baseada em algoritmo genético, para o problema clássico de alocação ótima de bancos de capacitores nas rede de distribuição, visando-se obter um melhor desempenho com relação a redução de perdas ativas e as quedas de tensão.

Além da aplicação da técnica do AG, a solução proposta apresenta o diferencial de incluir restrições de orçamento para a aquisição dos bancos de capacitores, tornando a solução do problema mais realista do ponto de vista da concessionária.

A metodologia empregada mostrou-se adequada e os resultados alcançados foram consistentes, segundo os diversos objetivos do problema, ou sejam, redução das perdas ativas e redução das quedas de tensão com investimento limitado para a aquisição da compensação reativa.

7. Referências Bibliográficas

- Amazonas Filho, E. M., Bezerra, U. H. *Optimal Reactive Power Allocation In Electrical Distribution Feeder Using A Genetic Multi-Objective Approach* in The 4th IASTED International Conference on POWER AND ENERGY SYSTEMS~EuroPES 2004~, Rhodes, Greece, June, 2004.
- Amazonas Filho, E. M., *Planejamento Ótimo de Redes de Distribuição de Energia na Redução de Perdas e Melhoria do Perfil de Tensão*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica e da Computação, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, 2003.

- Ananthapadmanabha, T; et al. *Knowledge-based expert system for optimal reactive power control in distribution system*. Electrical Power & Energy Systems, v.18, n.1, p.27–31, 1996.
- Bäck, T., et al. *Evolutionary Computation 1: Basic Algorithms and Operators*. Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 2000.
- Boone, G.; Chiang, H. D. *Optimal capacitor placement in distribution systems by genetic algorithm*, Electrical Power & Energy Systems, Vol.15, No.3, pp. 155–162, 1993.
- Dwyer, A., *The Use of Shunt Capacitors Applied for the Loss Saving*, in Proc. 1992 CEA CONFERENCE, 1992.
- Miranda V.; Fonseca, N. *New Evolutionary Particle Swarm Algorithm (EPSO) Applied to Voltage/Var Control* in Proc PSCC'02 – Power System Computation Conference, Sevilla, Espanha, 2002.
- Neagle, N. M; Samson, D. R. *Loss Reduction from Capacitor Installed on Primary Feeders*, AIEE Trans., Vol. 80, pp.1574-1577, Oct. 1956.
- Ng, H. N.; Salama, M. M.; Chikhani, A. Y. *Capacitor allocation by approximate reasoning: Fuzzy capacitor placement*, IEEE Trans. Power Systems, set. 1998 submitted for publication.
- Ng, H. N.; Salama, M. M.; Chikhani, A. Y. *Classification of Capacitor Allocation Techniques*, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.5, No.1, Jan. 2000.
- Santoso, N. I.; Tan; O. T. *Neural-net based real-time control of capacitors installed on distribution systems*. IEEE Trans. Power Delivery , Vol.5, No.1, pp.266–272, Jan. 1990.
- Sundhararajan, S.; Pahwa, A. *Optimal selection of capacitors for radial distribution systems using a genetic algorithm*, IEEE Trans. Power Systems, Vol.9, No.3, pp. 1499–1507, Ago. 1994.