

ALOCÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO ALGORITMO EVOLUTIVO MULTI-OBJETIVO.

OBJETIVO. Benvindo R. Pereira Júnior, José Roberto Sanches Mantovani, Antonio Marcos Cossi. – Engenharia Elétrica – Departamento de Engenharia Elétrica – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Campus de Ilha Solteira.

Nos sistemas de distribuição, o crescimento das cargas longe dos centros geradores, as extensas linhas que disponibilizam a energia para os consumidores, as perdas decorrentes dessa distância provocadas pela impedância dos cabos provocam variações de tensão indesejadas, sendo que algumas barras do sistema, devido a essas variações de tensão, podem estar operando fora dos limites impostos pelos órgãos responsáveis pela fiscalização da qualidade de energia [1]. Sendo assim torna-se necessário a instalação de dispositivos que assegurem que todo o sistema opere dentro dos limites preestabelecidos. Dentre as alternativas de planejamento de curto prazo para redes de distribuição está a instalação de bancos de capacitores shunt.

Os capacitores shunt adequadamente automatizados e instalados em um alimentador de distribuição melhoram o fator de potência do sistema; reduzem a carga aparente na fonte supridora e circuitos, liberando capacidade para a ligação de cargas adicionais; elevam a tensão na carga; reduzem a componente atrasada da corrente do circuito e como consequência reduzem as perdas ativas e reativas e reduz o custo de operação do sistema. No presente trabalho a alocação de banco de capacitores é abordada como um modelo de programação multi-objetivo [4]. Trata-se de um problema de difícil solução, com a inclusão das condições de operação reais dos sistemas que incluem requisitos de qualidade, confiabilidade e economia. A abordagem multi-objetivo é importante na solução de muitos problemas reais de otimização combinatória que admitem diferentes funções objetivos, em geral conflitantes entre si. Estes problemas possuem como solução um conjunto de soluções denominadas eficientes ou Pareto-ótimo. Na otimização multi-objetivo quando não se conhece a importância de cada um dos objetivos, todas as soluções Pareto-ótimas são igualmente importantes.

Para a solução deste problema de alocação de bancos capacitivos em alimentadores de distribuição, propõe-se um algoritmo evolutivo multi-objetivo (AE-MO), que é capaz de identificar um conjunto de soluções levando-se em consideração as funções objetivo que estão sendo analisadas, indicando quais são as barras a serem alocados os bancos capacitivos bem como o tipo de bancos de capacitores fixos e variáveis, potência os ajustes dos controles se este for variável. O esquema de codificação (estrutura cromossômica) e a forma de realização dos operadores genéticos (seleção, recombinação e mutação) foram desenvolvidos de forma adequada para considerar a natureza multi-objetivo e todas as características do problema sob estudo. A população inicial é gerada de forma aleatoriamente controlada, em que se permite alocar um número máximo de bancos de capacitores no alimentador. A avaliação das funções objetivo Fo_1 e Fo_2 é efetuada a partir do estado da rede que é obtido através de um algoritmo de fluxo de potência [2], com os bancos operando de acordo com o controle pré-estabelecidos, obedecendo as restrições de fluxo de potência e a restrição da barra ser ou não candidata à alocação de bancos. Assim, para mapear as possíveis soluções do problema é utilizada uma codificação em base decimal inteira, como ilustrada na Fig. 1. As posições no arranjo que variam de 1,2,...,2NB representam os tipos de bancos fixos e variáveis. Os subconjuntos 2NB+1,..., 5NB representam os *taps* dos bancos de capacitores nos três níveis de cargas considerados: Carga leve (CL), carga nominal (CN) e carga pesada (CP). Esta estrutura do indivíduo com informações armazenadas em subconjuntos propicia que, independentemente, cada um desses subconjuntos possa sofrer recombinação e mutação vinculadas às respectivas taxas de recombinação e mutação. A recombinação utilizada é a de um único ponto, mas a mutação foi adaptada para explorar as características físicas do problema.

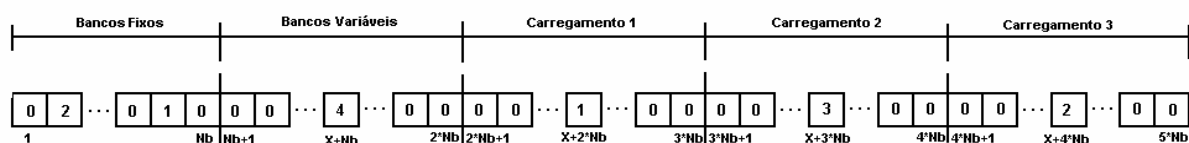


Figura 2 . Representação da recombinação

A mutação implementada é do tipo indutiva, considerando-se os tipos de bancos de capacitores fixos e variáveis, e os *taps* disponíveis para os capacitores variáveis. Desta forma, o operador de mutação é implementado através do seguinte algoritmo, considerando-se que cada uma das posições do cromossomo foi sorteada para sofrer mutação; *A posição selecionada contém zero* – Em função do subconjunto que esta posição ocupa no cromossomo sorteia-se um tipo de banco fixo ou variável para ser alocado, ou uma posição de *tap* para um dos níveis de carga; *A posição sorteada refere-se ao tipo de banco de capacitores fixo ou variável, ou à posição do tap dos bancos de capacitores variáveis*: Efetua-se a mutação da seguinte forma: (i) Se o valor desta posição está nos limites entre o menor e maior valor, seja de tipo de bancos de capacitores ou posição de *taps*, é selecionado aleatoriamente para ocupar esta posição do cromossomo um tipo de banco de capacitores ou valor de *taps* dentre os disponíveis; (ii) A posição selecionada representa o banco de capacitores de menor potência ou o menor valor de *tap* disponível. Neste caso seleciona-se para ocupar esta posição do cromossomo primeiro tipo de banco de capacitores ou o primeiro *tap* imediatamente posterior; (iii) A posição selecionada representa o banco de capacitores de maior potência ou o maior valor de *tap* disponível. Neste caso seleciona-se para ocupar esta posição do cromossomo primeiro tipo de banco de capacitores ou o primeiro *tap* imediatamente anterior. Finalmente verifica-se, se há configurações ineficazes, ou seja, está atribuído valor de *tap* de banco de capacitores num determinado nível de carregamento para uma barra que não possui banco alocado. Se este tipo de configuração existe para posição de *tap* é atribuído o valor zero.

Durante o processo de seleção é considerada a natureza multi-objetivo do problema através do critério de otimalidade de Pareto. Conhecendo-se os valores dos objetivos, verificam-se quais são os indivíduos dominantes para estes pertencerem à lista-Pareto, que contém os indivíduos dominantes. Segundo o conceito de dominância, uma solução domina a outra quando esta solução não é pior que as outras em todos os objetivos ou quando a mesma é estritamente melhor que as outras em pelo menos um objetivo. A cada geração esta lista é incrementada segundo os critérios de dominância e otimalidade de Pareto. Para que as características dos melhores indivíduos fossem repassadas às outras gerações utilizou-se uma técnica de elitismo. Como os melhores indivíduos, são relacionados para a elite, neste caso os não dominados, a elite passa a ser a própria lista Pareto.

A escolha dos indivíduos para serem recombinados é feita de forma aleatória, sendo que, um deles pertence à lista-Pareto e o outro à lista de indivíduos da geração atual, escolhido aleatoriamente. Na programação multi-objetivo a seleção por torneio se torna ineficiente, pois os objetivos considerados têm o mesmo grau de prioridade.

Uma maneira de obter uma maior diversificação da população foi utilizar taxas de recombinação e mutação adaptativas [3]. Foi adotado um critério de convergência verificando a atualização da lista-Pareto, se esta não fosse atualizada em um determinado número de gerações, o processo é considerado convergido. O Algoritmo Evolutivo Multi-Objetivo (AE-MO) desenvolvido e implementado para alocação otimizada de bancos de capacitores foi testado utilizando o sistema de 69 barras [2], considerando um horizonte de planejamento de um ano. Para os testes com carga pesada, considerou-se que o transformador da subestação tem controle automático de *taps*, e que a tensão no barramento dos alimentadores está ajustada em 1,05 pu. A figura 1 apresenta a solução encontrada pelo algoritmo e a figura 2 apresenta o perfil de tensão do sistema para o caso base, ou seja sem a alocação de bancos.

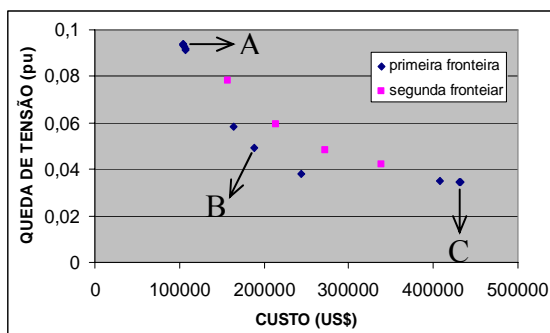


Figura 1. Dominância de Pareto no espaço objetivo.

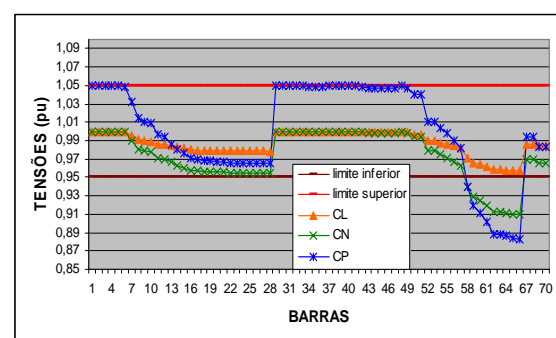


Figura 2. Perfil de Tensão do Sistema (Caso Base).

Na fronteira contendo o conjunto com as soluções ótimas de Pareto, a melhor solução a ser adotada para o problema depende de qual objetivo deve ser priorizado durante o planejamento. Para verificar a eficiência e validade do AE-MO em encontrar soluções de ótimas de Pareto, analisam-se detalhadamente sob os aspectos técnicos e econômicos as soluções assinaladas com A, B e C na Fig. 1. Para o caso base o sistema apresenta o perfil de tensão ilustrado na Fig. 2. As perdas neste caso totalizaram 51,992 (kW), 228,844 (kW), 780,797 (kW) para os níveis de carga leve (CL), nominal (CN) e pesada (CP) respectivamente.

A solução C que prioriza manter o perfil de tensão dentro dos limites pré-estabelecidos e com uma boa margem de regulação de tensão, apresenta custos elevados. Para esta solução o custo apresentado foi de US\$ 431.103,50. Neste caso, foram alocados bancos de capacitores fixos de 300 kVAr na barra 19, 600 kVAr nas barras 9, 28, 63 e de 900 kVAr nas barras 24, 60, 64, 66. Além disso, foi alocado um banco Variável na barra 64, cujo esquema de controle está representado na Tabela 1. As perdas totalizaram 460 (kW), 775 (kW), 822 (kW), para os níveis de cargas CL, CN e CP respectivamente. O comportamento do perfil de tensão para esta topologia está representado na Fig. 3. As perdas no sistema para esta configuração aumentaram devido o aumento de fluxo de reativos na rede, o que mostra a natureza multi-objetivo do problema de alocação de bancos de capacitores e os conflitos entre os objetivos redução de queda de tensão, perdas e custos de investimentos.

Para uma solução cuja prioridade é operar o sistema com o menor custo possível, com pouca exigência com relação ao perfil de tensão (solução A), uma das soluções encontradas pelo AE-MO é a seguinte: foram alocados três bancos fixos no sistema de 300 kVAr nas barras 19 e 61, 900 kVAr na barra 63, com um custo de US\$ 104.333,50. O comportamento do perfil de tensão para proposta de alocação de banco de capacitores está representado na Fig. 4. Neste caso as perdas para os níveis de carga CL, CN e CP foram de 47(kW), 149(kW), 557(kW), respectivamente.

Tabela 1. Controle dos bancos variáveis (Solução C).

Resultados Bancos Variáveis				
Barra	Tipo	Carga leve	Carga nominal	Carga pesada
64	3	0.0 kVAr	1500.0 kVAr	1500.0 kVAr

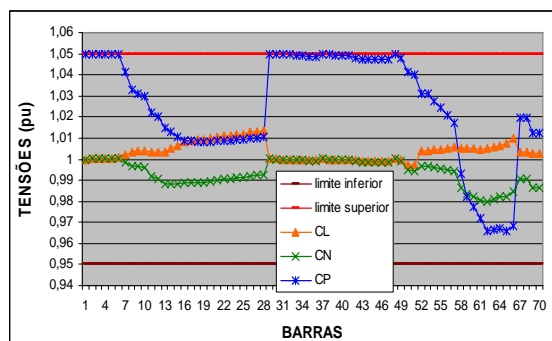


Figura 3. Perfil de Tensão do Sistema (Solução C)

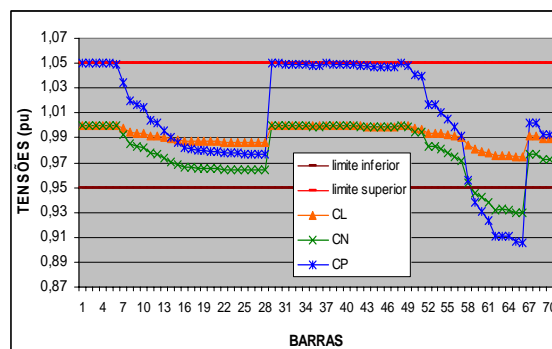


Figura 4. Perfil de Tensão do Sistema (Solução A)

Uma solução intermediária (solução B) que trata os dois objetivos de forma a minimizá-los simultaneamente, apresentou os seguintes resultados: custo total de US\$ 188.589,00, onde foram alocados 4 bancos fixos, de 300 kVAr na barra 60, 600 kVAr nas barras 61 e 64 e 900 kVAr na barra 62, além de bancos variáveis nas barras 64 e 65 com os respectivos esquemas de controle descritos na Tab. 2. Neste caso as perdas para os níveis de carga CL, CN e CP totalizaram 132 (kW), 291 (kW), 621 (kW). A Figura 5 representa o perfil de tensão para esta topologia.

Tabela 2. Controle dos bancos variáveis.

Resultados Bancos Variáveis				
Barra	Tipo	Carga leve	Carga nominal	Carga pesada
64	2	0.0 kVAr	300.0 kVAr	900.0 kVAr
65	2	0.0 kVAr	900.0 kVAr	900.0 kVAr

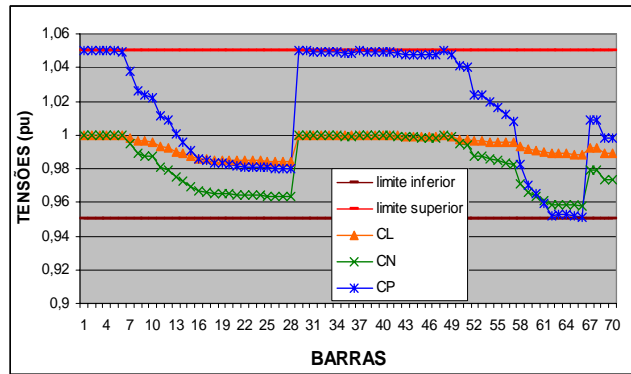


Figura 5. Perfil de Tensão do Sistema (Solução B).

Os testes apresentaram bons resultados onde pode-se observar claramente que os objetivos do problema sob análise são conflitantes. Assim o AE-MO encontrou soluções que possam contemplar a priorização de cada objetivo, e soluções que atendam os dois objetivos com a mesma prioridade. Entretanto para algumas soluções onde o custo é priorizado as quedas de tensão são muito grande, neste caso, o sistema pode estar operando fora dos limites pré-estabelecidos. Por outro lado melhorar ao extremo o perfil de tensão requer um investimento muito alto muitas vezes tornando-se inviável sob os aspectos operacionais com o aumento do nível de perdas técnicas.

Neste trabalho onde a alocação de banco de capacitores em sistemas de distribuição é formulada como um modelo de programação multi-objetivo, foram levadas em consideração as características de operação do sistema. Esta metodologia é eficiente, pois oferece um conjunto de soluções contendo as barras onde estão alocados os bancos fixos e variáveis, bem com o esquema de controle dos bancos variáveis, que podem ser utilizadas no planejamento do sistema de acordo com a necessidade do problema. Portanto, quando não se sabe as prioridades dos objetivos, todas as soluções são consideradas eficientes, transferindo para as empresas distribuidoras de energia, ou planejadores a escolha de qual será a melhor solução para o problema, levando-se em consideração aspectos técnicos e econômicos desejados. O esquema de codificação utilizado, juntamente com os operadores genéticos devidamente adaptados, proporcionaram um bom desempenho ao algoritmo. O fluxo de potência utilizado apresentou um bom desempenho, uma vez que este é uma ferramenta básica para o AE-MO desenvolvido.

O desempenho e convergência do algoritmo evolutivo multi-objetivo (AE-MO) sofre uma influência muito grande da população inicial. Uma população inicial gerada aleatoriamente pode fazer com que o AE-MO encontre um conjunto de soluções de ótima ou má qualidade dentro do espaço de busca do problema. Desta forma em desenvolvimentos futuros deste trabalho, serão pesquisadas técnicas heurísticas eficientes para geração da população inicial para simular a alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição reais de médio e grande portes.

[1] – Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2001). Resolução Normativa No. 505 de 21/11/2001.

[2] - Baran, M e Wu, F.F. "Optimal capacitor placement on radial distribution systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 735-743, January 1989.

[3] – Da Silva, L.G.W., Pereira, R.A.F. and Mantovani, J. R. S. Optimized allocation of sectionalizing switches and control and protection devices for reliability indices improvement in distribution systems, *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, pp. 51 – 56, 2004.

[4] – Milosević B., Begović M. “ Capacitor placement for conservative voltage reduction on distribution feeders”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 3, July 2004.

Bolsa: CNPQ