

ALOCAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS USANDO BUSCA DISPERSA

Marcos Célio de Sousa
mcs193@hotmail.com

Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo
leohfmp@gmail.com

Rubén Augusto Romero Lázaro
ruben@dee.feis.unesp.br

Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica – LaPSEE
Departamento de Engenharia Elétrica – UNESP – Ilha Solteira
Avenida Brasil, 56 – Centro
15.385-000 ILHA SOLTEIRA, SP, BRASIL

RESUMO

Neste trabalho é apresentada uma metodologia, baseada na meta-heurística de Busca Dispersa, para resolver o problema de alocação de bancos de capacitores em redes de distribuição radiais. A função objetivo a ser minimizada incorpora os custos totais de investimentos (aquisição, instalação e manutenção) e de operação. Para o cálculo do ponto de operação de cada proposta de solução, foi implementado um algoritmo de Fluxo de Carga de varredura. O método considera a instalação de bancos de capacitores fixos e chaveados. A metodologia proposta foi implementada em linguagem MATLAB e testada em dois sistemas presentes na literatura: 136 e 202 barras. Os resultados obtidos com o algoritmo implementado reduziram as perdas elétricas e melhoraram o perfil de tensão dos sistemas testados. A partir dos resultados foi verificado que a metodologia apresentou um bom desempenho.

PALAVRAS CHAVE. Otimização de sistemas de distribuição. Alocação de bancos de capacitores. Busca Dispersa.

Área principal: EN – PO na Área de Energia.

ABSTRACT

This work proposes a methodology, based on the Scatter Search metaheuristic, to solve the problem of capacitor placement in radial distribution networks. The objective function to be minimized incorporates the total value of investments (acquisition, installation and maintenance of capacitor banks) and operational costs. To obtain the operation state of each proposed solution, a specialized radial load flow algorithm is used. The method also considers the installation of fixed and switched capacitor banks. The methodology was implemented in MATLAB and tested with two systems presented in literature: the 136-node and the 202-node systems. The results show that loss reduction and voltage profile improvement can be achieved with the installation of capacitor banks in the network. From the obtained results, it was verified that the methodology presented a good performance.

KEYWORDS. Distribution systems optimization. Allocation of capacitors banks. Scatter Search.

Main area: EN – OR Area of Energy.

1. Introdução

Os sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE) são uma parte do sistema elétrico, compostos pelas redes elétricas primárias (de média tensão), e redes secundárias (de baixa tensão). São constituídos por fios condutores, transformadores e equipamentos diversos de medição, controle e proteção. Bancos de capacitores (BCs) são fontes de potência reativa, cujo objetivo de aplicação em sistemas de potência é a compensação de reativos. Existem dois tipos de BCs: os fixos (que estão constantemente conectados ao sistema) e os chaveados (que podem ser ajustados). Os BCs chaveados podem ser automáticos, ou seja, realizam uma compensação automática, por meio de sinais de tensão e corrente, ligando e desligando módulos capacitivos de acordo com a necessidade. Quando adequadamente utilizados permitem a obtenção de um conjunto de benefícios correlatos, que incluem a redução de perdas de energia, correção de perfis de tensões, controle dos fluxos de potência, melhoria do fator de potência e aumento da capacidade do sistema.

Os benefícios reais obtidos com a instalação de BCs em sistemas de distribuição dependem das características dos equipamentos e da forma como é feita esta instalação. Especificamente, dependem do número e tamanho dos BCs, da localização, do tipo (fixos ou chaveados) e do esquema de controle utilizado. Neste trabalho é apresentada uma metodologia para resolver o problema da alocação de BCs em redes de distribuição radiais (PABCSDR), baseada na meta-heurística de Busca Dispersa (BD) apresentada em detalhes em Laguna e Martí (2003), sendo um método evolucionário, cujos conceitos e princípios foram propostos na década de 1970 (GLOVER, 1977), e suas bases foram formuladas antes dos anos 1960, com estratégias que consistem em efetuar buscas que enfatizam a diversificação e a intensificação, atuando sobre um Conjunto de Soluções de Qualidade (CSQ). Esta metodologia foi escolhida por apresentar excelentes resultados na área de Pesquisa Operacional, mas ser pouco utilizada na otimização de sistemas elétricos.

Sobre o PABCSDR, Mekhamer *et al.* (2002) apresenta uma revisão completa sobre as principais metodologias utilizadas para resolvê-lo, incluindo métodos exatos, heurísticos e meta-heurísticos. Em Duran (1968) foi apresentada uma abordagem de programação dinâmica para encontrar o tamanho, a quantidade e a localização dos bancos de capacitores fixos no alimentador com cargas discretas. Nos trabalhos de Grainger e Civanlar (1985) foi apresentado um método para o controle de volt/var em sistemas de distribuição radiais, com o objetivo de minimizar a potência de pico e as perdas de energia, e também fornecer um perfil de tensão suave, ao longo de uma rede de distribuição com ramos laterais sob diferentes condições de cargas.

Em Baran e Wu (1989) foram apresentadas uma formulação geral e uma metodologia eficaz de solução do PABCSDR. O principal objetivo consiste em minimizar os custos de instalação dos bancos, e também os custos das perdas de potência ativa no sistema, e dessa forma manter a regulação de tensão. Uma metodologia de solução foi desenvolvida para a decomposição do problema, dividindo-o em dois níveis.

No trabalho de Chiang *et al.* (1990) foi apresentada uma meta-heurística *Simulated Annealing* para resolver o PABCSDR, com a função de determinar a localização, tipo e tamanho dos bancos de capacitores, considerando diferentes níveis de carga. Em Boone e Chiang (1993) foi apresentada uma proposta utilizando um Algoritmo Genético para resolver o problema da alocação de bancos de capacitores fixos em sistemas de distribuição radiais. Na função objetivo encontra-se os custos totais das perdas de energia, e os custos de alocação dos bancos de capacitores, incluindo compra, instalação e manutenção. Em Chiou *et al.* (2004) foi apresentada uma metodologia com o intuito de solucionar o problema de alocação de bancos de capacitores para sistemas de grande porte com maior eficiência. Foi colocada em prática uma meta-heurística tomando como base a evolução diferencial híbrida da direção das formigas.

Mais recentemente, em Rao, Narasimhamb e Ramalingaraju (2011) foi apresentada uma metodologia com o objetivo de reduzir as perdas de energia e melhorar o perfil de tensão do sistema. A metodologia de solução é dividida em duas etapas: na primeira etapa os fatores de sensibilidade de perdas são usados para determinar as barras em que serão alocados capacitores, e na segunda etapa é utilizado o algoritmo de *Plant Growth Simulation* para estimar o tamanho ideal dos capacitores nas barras previamente selecionadas.

Em Singh e Rao (2012) foi apresentada uma abordagem de otimização por enxame de

partículas (PSO) para resolver o problema de alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição radiais, cujo objetivo consiste na redução das perdas de energia e na manutenção da regulação de tensão. No trabalho de Ribeiro (2013) são apresentados dois modelos, um de Programação Linear Inteira Mista e outro de Programação Cônica de Segunda Ordem Inteira Mista, para resolver o problema de alocação de BCs em sistemas de distribuição de energia elétrica radiais, com o propósito de melhorar o perfil de tensão e minimizar os custos das perdas de energia e de investimento. Em Farahani *et al.* (2013) é proposto, simultaneamente, alocar BCs e fazer o recondutoramento do sistema, de forma a reduzir as perdas em redes de distribuição. Um algoritmo genético especializado é apresentado e os resultados demonstram que considerar ambos os problemas simultaneamente leva a soluções de boa qualidade.

Nas seções seguintes é feita uma introdução sobre a meta-heurística de Busca Dispersa, em seguida é apresentada a metodologia especializada proposta para resolver o PABCSDR, e finalmente são apresentados os resultados obtidos para dois sistemas teste e as conclusões gerais.

2. A Meta-heurística de Busca Dispersa

A meta-heurística de BD foi introduzida em 1977 por Fred Glover (GLOVER, 1977), e provém do inglês *Scatter Search*. Incorporada como uma heurística para programação inteira, ela contrapõe o efeito aleatório dos processos de otimização, e propõe de forma robusta e sofisticada buscar o ordenamento de soluções dentro de um espaço de busca considerado.

A metodologia apresentada sobre Busca Dispersa é baseada em Laguna e Martí (2003). Ela é fundamentada em uma estratégia de busca que realça diversificação e intensificação, atuando sobre um Conjunto de Soluções de Qualidade (CSQ). Um estudo aprofundado sobre este método pode ser encontrado em Martí, Laguna e Glover (2006).

2.1. Desenvolvimento da Meta-heurística de Busca Dispersa

Na proposta original de BD são obtidos pontos ou soluções de forma sistematizada, de maneira a evitar a aleatoriedade, e representar as características de várias partes de um espaço de busca. Através de uma sucessão coordenada de busca a partir de soluções já criadas, é selecionado um subconjunto daquelas soluções que contemplem prioritariamente diversidade ou qualidade, ou seja, pode-se dizer que a BD trabalha com um conjunto de soluções, chamado de CSQ, para gerar outras soluções novas de melhor qualidade que as soluções correntes no CSQ. Em contrapartida, com outros algoritmos evolutivos como os algoritmos genéticos, a BD é baseada em métodos sistemáticos com a finalidade de criar novas soluções, uma das estratégias utilizada pela BD é a diversificação na busca. Em Glover (1998) foi publicada uma versão mais específica do método, onde ficou esclarecido e simplificado muitas das ideias expostas em trabalhos anteriores. Esta publicação teve um grande impacto no mundo científico, e como tal serviu como referência padrão da BD.

2.2. Modelo de Busca Dispersa proposta por Glover

O método apresentado por Glover (1998) é amplamente utilizado como referência na implementação do algoritmo de BD em diversos problemas. Os procedimentos básicos deste modelo reformulado são apresentados a seguir:

1. Inicialmente é gerado um conjunto de soluções para garantir um nível crítico de diversidade, e em seguida é aplicada uma heurística na tentativa de melhorar sua qualidade. Desta forma selecionam-se para compor o CSQ as melhores soluções considerando tanto a qualidade quanto a diversidade.
2. Novas soluções são criadas a partir das combinações estruturadas das soluções inseridas no CSQ.
3. É aplicada novamente a heurística de melhoramento que foi usada no passo 1 nas soluções obtidas no passo 2, desta maneira ela é melhorada e são retiradas possíveis infactibilidades.
4. São extraídas as melhores soluções encontradas no passo anterior que são acrescentadas ao CSQ, caso estas soluções sejam de melhor qualidade na função objetivo.
5. Os passos 2, 3 e 4 são repetidos até que o CSQ não tenha mais nenhuma alteração.

O ponto decisivo deste algoritmo, é o fato de que é possível provocar um deslocamento de tais soluções para regiões do espaço ainda não exploradas, e desta maneira a exploração não fica restrita ao espaço de busca compreendido entre duas soluções. A estratégia para combinar as escolhas de duas ou mais soluções do CSQ são preponderantes dentro do contexto, principalmente para permitir que novas soluções sejam criadas e desta forma compor a atualização do CSQ. O método aplicado deve estar em condições para que o mecanismo de melhora consiga atuar sobre as regiões inexploradas. O modelo generalizado para implementação da BD é basicamente composto de cinco etapas, que são descritas a seguir:

1. Técnica da Diversidade na geração das soluções, ou seja, é gerada uma sequência de soluções distintas que representam o espaço de busca de maneira geral.
2. Técnica de melhoramento das soluções propostas. Esta técnica consiste em aplicar uma heurística de busca local toda vez que aparecerem soluções inexploradas ou que possam ser melhoradas.
3. Técnica de atualização do CSQ. Neste método são incorporadas as melhores soluções que foram encontradas durante os procedimentos, neste caso o conjunto só comporta até um máximo de 20 soluções, sendo que elas serão substituídas de acordo com a diversidade ou qualidade.
4. Técnica de geração de subconjuntos de soluções. Neste passo do algoritmo, a geração de subconjuntos especifica que cada subconjunto conterá duas ou mais soluções do CSQ, e que em seguida serão submetidas ao método de combinação de soluções.
5. Técnica de combinação de soluções. Neste contexto temos que, a partir da combinação das soluções de cada subconjunto, são geradas uma ou mais soluções.

Tem-se que, para cada solução encontrada pela técnica da geração de soluções, esta será submetida à técnica de melhoramento de soluções, portanto o melhoramento é uma forma de explorar a vizinhança desta solução através de uma busca local sistematizada, na tentativa de encontrar uma solução vizinha de melhor qualidade que ela, ou seja, melhor valor na função objetivo.

3. Meta-heurística de Busca Dispersa Aplicada ao PABCSDR

Nesta seção é apresentada a metodologia especializada, baseada na meta-heurística de BD, para resolver o PABCSDR. São discutidas a representação de uma proposta de solução do problema, a forma de se calcular a função objetivo e os detalhes da meta-heurística.

3.1. Modelo Matemático do PABCSDR

O modelo ideal (exato) para o PABCSDR é de Programação Não Linear Inteira Mista, não convexo e de difícil solução, para o qual métodos clássicos de otimização não garantem convergência para um ótimo global. Portanto, para resolvê-lo, é proposta uma meta-heurística de BD especializada. A seguir é feita uma descrição sucinta do modelo matemático do PABCSDR.

A formulação matemática usada neste estudo tem como objetivo minimizar os custos das perdas de energia para os referidos níveis de cargas do sistema, e os custos dos bancos de capacitores (fixos e/ou chaveados) tanto na instalação, quanto na manutenção dos mesmos.

3.2. Cálculo da Função Objetivo

A função objetivo do problema é apresentada em (1). Nela o primeiro termo corresponde ao custo anual das perdas de energia no sistema, e o segundo termo corresponde aos custos de compra, instalação e manutenção dos BCs.

$$\min v = \sum_{d \in \Omega_d} c_d^{ls} \Delta_d \sum_{ij \in \Omega_l} g_{ij} (V_{i,d}^2 + V_{j,d}^2 - 2V_{i,d}V_{j,d} \cos \theta_{ij,d}) + k_{bc} \sum_{i \in \Omega_b} (c^{bc} q_i^{bc} + c^{sw} q_i^{sw} + c^{un} n_i^{bc}) \quad (1)$$

Em (1), Ω_d é o conjunto de níveis de demanda, Ω_l é o conjunto de ramos e Ω_b é o conjunto de barras do sistema. Os parâmetros são: c_d^{ls} , que representa o custo das perdas, no nível de demanda d , Δ_d é a duração do nível de demanda d , g_{ij} é a condutância do ramo ij , k_{bc} é a taxa de recuperação de capital da construção de BCs, c^{bc} é o custo de instalação e manutenção, anualizado, de um BC fixo ou chaveado, c^{sw} é o custo anualizado do equipamento para o chaveamento dos módulos de capacitores de um BC chaveado e c^{un} é o custo unitário anualizado de um módulo de

capacitor padrão. As variáveis são: $V_{i,d}$ que representa o módulo da tensão na barra i , no nível de demanda d , $\theta_{ij,d}$ é o ângulo da tensão entre as barras i e j , no nível de demanda d , as variáveis binárias de investimento q_i^{bc} e q_i^{sw} , que representa a alocação de um BC fixo ou chaveado na barra i e a alocação do equipamento para o chaveamento dos módulos de capacitores na barra i , respectivamente, e a variável inteira n_i^{bc} , que representa o número de módulos de capacitores instalados na barra i . Neste trabalho, o termo da função objetivo correspondente ao custo anual das perdas de energia no sistema é calculado através da execução de um algoritmo de fluxo de carga para cada nível de demanda, utilizando o método de varredura de Shirmohammadi *et al.* (1988). O segundo termo pode ser calculado de forma trivial para uma proposta de solução. As restrições do problema incluem:

1. Balanço de potência ativa e reativa em cada barra do sistema;
2. Limite das tensões nas barras;
3. Limite das correntes nos ramos;
4. Restrições referentes a alocação dos BCs fixos e chaveados.

Deve-se notar que, na metodologia proposta, as restrições de balanço de potência serão sempre cumpridas pelo algoritmo de fluxo de carga, e desta forma, para ser factível, uma proposta de solução deve atender aos limites de tensões nas barras e de correntes nos ramos do sistema. As restrições lógicas referentes a alocação de BCs fazem parte da representação de uma proposta de solução do problema.

Portanto, penaliza-se na função objetivo as violações dos limites de tensão nas barras e de corrente nos ramos, conforme mostrado em (2).

$$v' = v + \rho \sum_{d \in \Omega_d} \left[\sum_{i \in \Omega_b} \alpha_{i,d} (\underline{V} - V_{i,d}) + \sum_{i \in \Omega_b} \beta_{i,d} (V_{i,d} - \bar{V}) + \sum_{ij \in \Omega_l} \gamma_{ij,d} (I_{ij,d} - \bar{I}_{ij}) \right] \quad (2)$$

Em (2), ρ é um fator de penalização que deve ser grande (neste trabalho utiliza-se $\rho = 10^7$ de maneira que a metodologia descarte toda e qualquer solução inactível), $\alpha_{i,d}$ vale 0 se a tensão em uma barra i , no nível de demanda d , não estiver violando o limite inferior e vale 1 em caso contrário, $\beta_{i,d}$ vale 0 se a tensão em uma barra i , no nível de demanda d , não estiver violando o limite superior e vale 1 em caso contrário. A variável $\gamma_{ij,d}$ vale 0 se a corrente em um ramo ij do sistema, no nível de demanda d , não estiver violando o limite superior e vale 1 em caso contrário.

3.3. Representação de uma Proposta de Solução

Uma representação inteira foi adotada para representar uma proposta de solução. Tal proposta foi desmembrada em três subconjuntos, em que cada subconjunto representa um nível de demanda (d_i). Os elementos de cada nível de demanda correspondem a quantidade de BCs de uma determinada potência reativa, os quais serão alocados em uma determinada barra i . De maneira simultânea, a codificação proposta permite determinar não só a localização, mas também o tamanho e os tipos dos BCs. A Figura 1 ilustra a codificação adotada para o problema.

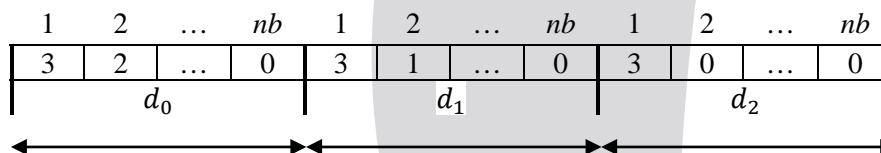


Figura 1: Representação de uma proposta de solução.

Na Figura 1, por exemplo, foram alocados três bancos fixos na barra 1 (são fixos pois estão na mesma quantidade nos três níveis de demanda na barra 1) e dois bancos chaveados na barra 2, sendo que no nível de demanda d_0 dois bancos estão conectados ao sistema, no nível de demanda d_1 um banco está conectado e em d_2 nenhum banco está conectado a esta barra.

3.4. Geração do Conjunto Inicial de Soluções

Primeiramente para se obter uma informação sobre a sensibilidade da função objetivo em

relação à instalação de um BC no sistema, utiliza-se a metodologia mostrada na Figura 2. Considera-se sem perda de generalidade, que as barras do sistema estejam numeradas de 1 à nb , onde nb é o número de barras do sistema.

Repita os passos seguintes até que todas as nb barras do sistema tenham sido analisadas:

- (1) Faça $i \leftarrow 1$;
- (2) Insira um BC fixo na barra i ;
- (3) Calcule e armazene o valor da função objetivo correspondente a inserção de um único BC na barra i ;
- (4) Remova o BC da barra i ;

Figura 2: Algoritmo para análise da sensibilidade na função objetivo.

Na metodologia mostrada na Figura 2, é inserido um banco em cada barra, em seguida faz-se a retirada do mesmo, e em cada inserção verifica-se o valor da função objetivo, e este é armazenado. Considera-se então, no conjunto inicial de soluções a instalação de BCs fixos apenas nas barras cuja função objetivo correspondente, obtida pelo algoritmo da Figura 2, esteja entre as 40% melhores. Definiu-se o tamanho do conjunto inicial de soluções como sendo $|P| = 100$, e para cada solução, pode-se instalar BCs fixos em até 5 barras distintas. O número de BCs é escolhido aleatoriamente entre 1 e o número máximo de BCs permitidos por barra. A Figura 3 mostra um exemplo de conjunto inicial de soluções para três perfis de demanda uniformes.

PESADO				MÉDIO				LEVE				FO
1	...	2	...	1	...	2	...	1	...	2	...	F_1
...	3	...	...	...	3	...	...	...	3	...	...	F_2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2	...	3	...	2	...	3	...	2	...	3	...	$F_{|P|}$

Figura 3: Conjunto inicial de soluções.

3.5. Conjunto de Solução de Qualidade

O CSQ será composto por $b = 5$ soluções, sendo que são escolhidas as soluções com melhor valor na função objetivo do conjunto de soluções iniciais, e que apresentam diversidade, ou seja, apresentem BCs instalados em barras diferentes. A Figura 4 ilustra um exemplo de CSQ.

PESADO				MÉDIO				LEVE				FO
1	...	2	...	1	...	2	...	1	...	2	...	F_1
...	3	...	...	...	3	...	...	...	3	...	...	F_2
3	...	1	...	3	...	1	...	3	...	1	...	F_3
...	...	...	2	...	...	...	2	...	...	...	2	F_4
...	3	...	1	...	3	...	1	...	3	...	1	F_5

Figura 4: Conjunto de soluções de qualidade.

3.6. Geração do Subconjunto de Soluções

Para a geração dos subconjuntos são realizadas as $n(n - 1)/2$ combinações (duas a duas) das soluções do CSQ. A estratégia utilizada para gerar este subconjunto de combinação das soluções é crucial para encontrar soluções de boa qualidade, e desta forma evitar que o método pare em ótimos locais de baixa qualidade. Novas soluções serão geradas pela técnica de recombinação em vários pontos, baseada no algoritmo genético (AG), como mostra a Figura 5. As soluções obtidas poderão ser de baixa qualidade e até infactíveis, sendo assim estas novas soluções passarão por uma heurística de melhoramento.

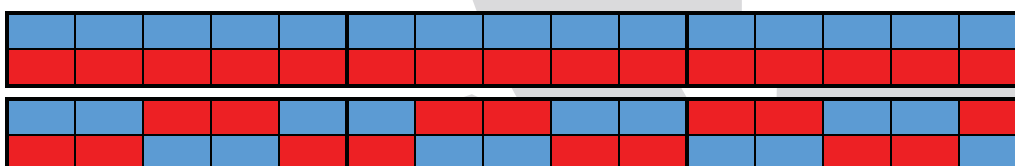


Figura 5: Recombinação de duas soluções.

No caso em que o CSQ possui 5 soluções, ou seja, $n = 5$ então $n(n - 1)/2 = 10$. Cada recombinação gera duas soluções novas, portanto 20 novas soluções são geradas a partir do CSQ.

3.7. Melhoramento das Soluções

Todas as soluções do subconjunto de soluções passam por uma fase de melhoria. Os passos desta fase são descritos a seguir.

3.7.1. Correção dos Dados

Durante as recombinações, os bancos serão realocados de tal forma que no nível pesado poderão aparecer um número de bancos alocados menor que no leve ou no médio, ou explicado de outra forma: n_{BC}^{pesado} pode ser menor que $n_{BC}^{médio}$ ou n_{BC}^{leve} para uma mesma barra, sendo assim há a necessidade de reordená-los. A Figura 6 mostra como o reordenamento é feito. Trata-se de garantir que o número de BCs conectado em uma barra atenda: $n_{BC}^{leve} \leq n_{BC}^{médio} \leq n_{BC}^{pesado}$.

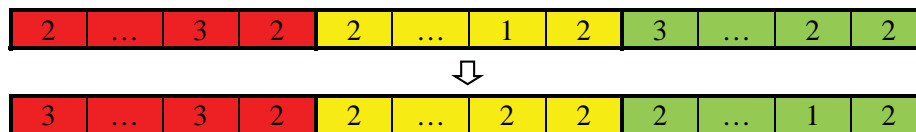


Figura 6: Correção dos dados de uma proposta de solução.

3.7.2. Remover BCs Chaveados

Nesta etapa a melhoria da solução é feita escolhendo-se uma barra que possui um BC chaveado e removendo-o. Se a solução assim obtida for melhor que a solução corrente, será feita a atualização da mesma, caso contrário os BCs chaveados serão adicionados novamente. A operação é repetida para todas as barras com BCs chaveados, sem repetição.

3.7.3. Considerar o Número Inicial de BCs como Sendo Todos Fixos

Escolhe-se aleatoriamente uma barra que possui um BC chaveado, fazendo com que todos os BCs a ela conectados sejam fixos. Se a solução assim obtida for melhor que a solução corrente, será feita a atualização, caso contrário os BCs voltam a ser chaveados.

3.7.4. Deslocar os BCs para as Barras Vizinhas

Escolhe-se aleatoriamente uma barra que possui BCs, movem-se estes BCs para todas as barras vizinhas e escolhe-se a melhor vizinha. Se a solução assim obtida for melhor que a solução corrente, será feita a atualização da mesma, caso contrário os BCs voltam para a barra inicial. A operação é repetida para todas as barras com BCs. Esta operação é ilustrada na Figura 7.

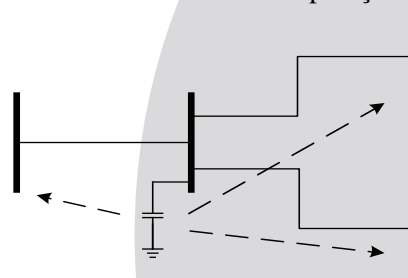


Figura 7: Mudança de um BC para as barras vizinhas.

3.7.5. Adicionar um BC

Escolhe-se uma barra do sistema e adiciona-se um BC fixo. Se a solução obtida for melhor, ela é atualizada, caso contrário retira-se o banco adicionado, e escolhe-se outra barra e adiciona-se um banco novamente. Repete-se estes passos até que todas as barras tenham sido analisadas.

3.7.6. Remover um BC

Escolhe-se uma barra do sistema com BC instalado, e remove-se um BC. Se a solução em análise for melhor, atualiza-se a mesma, caso contrário adiciona-se o banco removido e escolhe-se outra barra para remover um banco. Este passo é repetido para todas as barras com BCs.

3.7.7. Atualização do CSQ

Na última etapa é feita a atualização do CSQ, ou seja, quando todas as soluções combinadas passarem pela fase de melhoria, aquelas soluções obtidas que são de melhor qualidade que as piores do CSQ devem entrar no CSQ. O algoritmo de BD será executado até que nenhuma solução de um dado subconjunto de soluções melhorada seja aceita pelo CSQ. Adicionalmente, deve-se garantir soluções com diversidade no CSQ. Isto é feito garantindo-se que, no caso em que o tamanho do CSQ é 5, três soluções sejam de qualidade e duas delas apresentem diversidade, com BCs instalados em barras em que a soluções de qualidade não possuam BCs. Além disto, nenhuma solução do CSQ pode se repetir.

4. Resultados

A metodologia proposta para resolver o PABCSDR foi testada em dois sistemas de distribuição: de 136 e 202 barras (RIBEIRO, 2013). Os limites de tensão considerados foram $\underline{V} = 0,93$ pu e $\bar{V} = 1,05$ pu. Os valores adotados para a potência reativa nominal de cada módulo de um BC foi de 300 kVAr, o custo de compra de um BC fixo é US\$ 900,00, e o custo do equipamento de chaveamento é de US\$ 300,00. O custo de instalação e manutenção dos BCs em uma barra do sistema é de US\$ 1.000,00. Todos estes parâmetros foram definidos baseando-se em Ribeiro (2013). A meta-heurística foi implementada em MATLAB e os sistemas foram testados em um computador com processador de Intel core i7 de 3,40 GHz e 16 GB de RAM.

4.1. Sistema de 136 Barras

No estado inicial do sistema de 136 barras houve violações nos limites de tensão. Os percentuais dos fatores de multiplicação das cargas foram de: 150 % para o nível Pesado; 100 % para o Médio e 60 % para o Leve. Foram adotados períodos de 1000 h, 6760 h e 1000 h para os níveis de demanda pesado, médio e leve respectivamente. Os custos das perdas adotado foram de 0,06 US\$/kWh em todos os níveis de demanda. Para este sistema foi estipulado que o número máximo de módulos de capacitores a ser instalados em uma barra seria igual a quatro. Para o sistema de 136 barras, o algoritmo de BD fez três iterações. Foram resolvidos 32595 problemas de fluxo de carga radial. O tempo de processamento foi de 16,27 segundos. A Tabela 1 mostra o estado inicial do sistema de 136 barras.

Tabela 1: Perdas de potência e dos custos no estado inicial (sistema de 136 barras).

Nível de demanda	Perdas no sistema [kW]	Custo das perdas [US\$]
Pesado	753,26	45.196,03
Médio	320,26	129.900,06
Leve	111,69	6.701,53
Custo total das perdas [US\$]		181.797,63

Para a melhor solução encontrada, no nível de demanda pesado, as perdas no sistema passaram a ser de 674,56 kW, com custo de US\$ 40.474,05, no nível médio foram 286,64 kW, com custo de US\$ 116.264,81, e para o nível leve 105,71 kW, com custo de US\$ 6.343,13. O custo total das perdas no sistema passou a ser US\$ 163.081,99. Os resultados do sistema após a alocação dos BCs são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados após alocação dos BCs (sistema de 136 barras).

Nível de demanda	Perdas [kW]	Custo das perdas [US\$]	Redução dos custos [US\$]
Pesado	674,56	40.474,05	4.721,98
Médio	286,64	116.264,81	13.635,25
Leve	105,71	6.343,13	358,39
Custo total das perdas [US\$]		163.081,99	
Redução dos custos [US\$]		18.715,63	

Foram alocados dois bancos de capacitores fixos na barra 14, $n_{14}^{bc} = 2$, na barra 32 também foram alocados dois bancos de capacitores fixos, $n_{32}^{bc} = 2$, na barra 106 foram alocados quatro bancos de capacitores fixos, $n_{106}^{bc} = 4$, e na barra 109 foi alocado um banco de capacitor fixo,

$n_{109}^{bc} = 1$. O custo da compra, instalação e manutenção dos BCs foram US\$ 12.100,00, e o valor final da função objetivo foi de US\$ 175.181,99. A redução total obtida na função objetivo considerando os estados iniciais e finais foram de US\$ 6.615,63, o que representa uma redução percentual de 3,64 %. Além disso, a instalação de BCs tornou factível a operação no nível pesado, pois sem BCs a operação violava os níveis de tensão. A Figura 8 mostra os perfis de tensão no sistema de 136 barras antes e depois da alocação dos BCs. As curvas em vermelho representam os níveis de tensão antes da alocação, e as em azul após a alocação. É possível observar que não houve violação nos limites de tensão no sistema em nenhum dos três níveis de demanda após a alocação dos BCs. A Figura 9 ilustra a evolução do algoritmo de BD até encontrar a solução do problema.

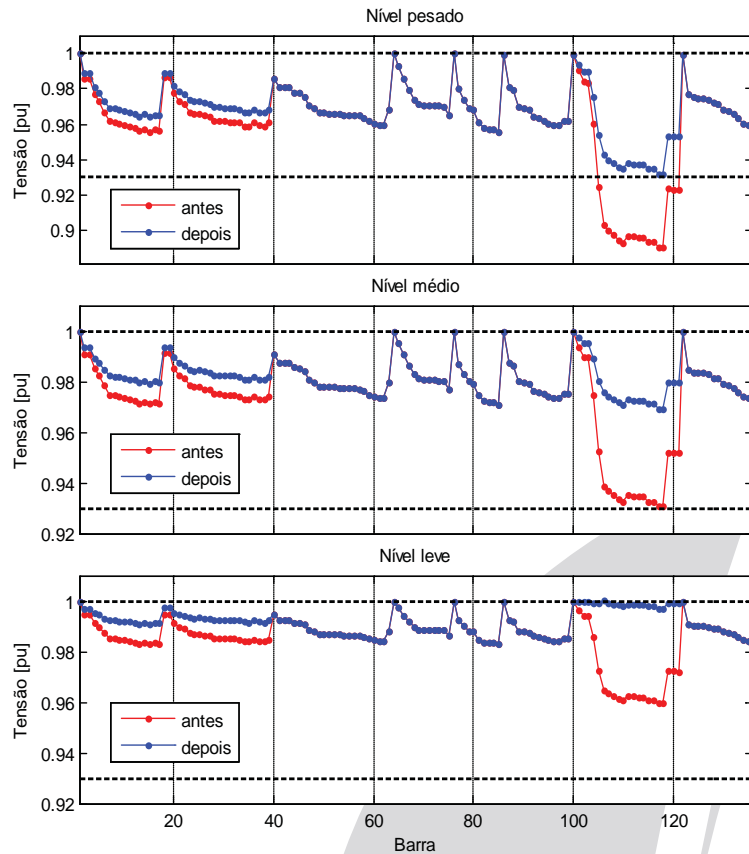


Figura 8: Perfil de tensão no sistema de 136 barras antes e depois da alocação dos BCs.

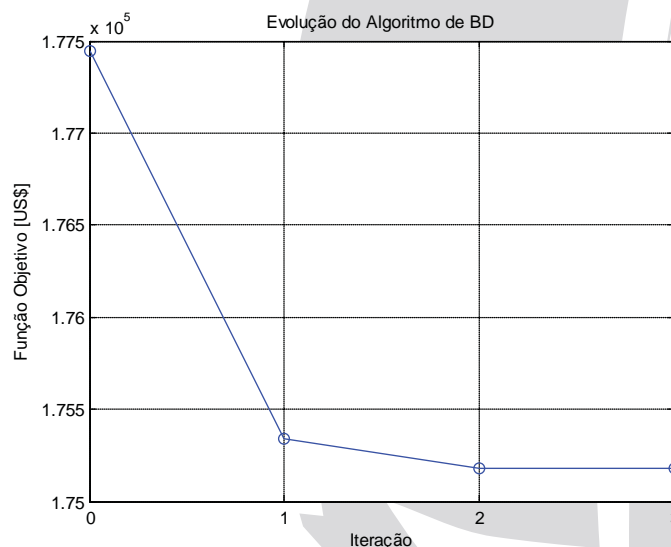


Figura 9: Evolução do algoritmo de BD no sistema de 136 barras.

4.2. Sistema de 202 Barras

No estado inicial do sistema de 202 barras houve violações nos limites de tensão. Os percentuais dos fatores de multiplicação das cargas foram de: 166 % para o nível Pesado e 100 % para o Médio. Foram adotados períodos de 1000 h e 7760 h para os níveis de demanda pesado e médio respectivamente. O custo das perdas foi de 0,02 US\$/kWh nos dois níveis de demanda. Para este sistema foi estipulado que o número máximo de BCs a ser instalados em uma barra seria igual a seis. O estado inicial do sistema de 202 barras é mostrado na Tabela 3.

Tabela 3: Perdas de potência e dos custos no estado inicial (sistema de 202 barras).

Nível de demanda	Perdas no sistema [kW]	Custo das perdas [US\$]
Pesado	1.603,63	32.072,75
Médio	552,00	85.671,55
Custo total das perdas [US\$]		117.744,30

Para o sistema de 202 barras, o algoritmo de BD fez três iterações. Foram resolvidos 28562 problemas de fluxo de carga radial. O tempo de processamento foi de 27,54 segundos. Foram alocados cinco bancos de capacitores fixos na barra 130, $n_{130}^{bc} = 5$, e na barra 200 também foram alocados cinco bancos de capacitores fixos, $n_{200}^{bc} = 5$.

O custo da compra, instalação e manutenção dos BCs foi US\$ 11.000,00 e o valor final da função objetivo foi de US\$ 117.113,25. Para o nível de demanda pesado, as perdas no sistema passaram a ser de 1.483,41 kW, com custo de US\$ 29.668,21, e no nível médio foram 492,55 kW, com custo de US\$ 76.445,03. O custo total das perdas no sistema foi de US\$ 106.113,25.

A redução total obtida na função objetivo considerando o estado inicial e final foi de US\$ 631,05, o que representa uma redução percentual de 0,53 %, além de tornar factível a operação no nível de carga pesado. A Tabela 4 mostra o resumo da solução obtida pela BD.

Tabela 4: Resultados após alocação dos BCs (sistema de 202 barras).

Nível de demanda	Perdas [kW]	Custo das perdas [US\$]	Redução dos custos [US\$]
Pesado	1.483,41	29.668,21	2.404,53
Médio	492,55	76.445,03	10.226,51
Custo total das perdas [US\$]		106.113,25	
Redução dos custos [US\$]			11.631,05

A Figura 12 mostra os perfis de tensão no sistema de 202 barras antes e depois da alocação dos BCs para os dois níveis de demanda. As curvas em vermelho representam os níveis de tensão antes da alocação, e as em azul após a alocação. É possível observar que não houve violação em nenhum dos dois níveis de demanda após a alocação dos BCs.

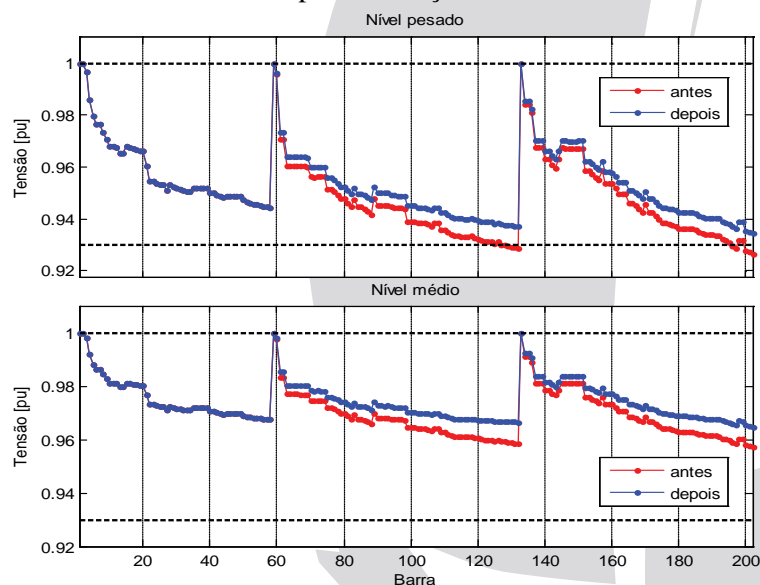


Figura 10: Perfil de tensão no sistema de 202 barras antes e depois da alocação dos BCs.

A Figura 11 ilustra a evolução do algoritmo de BD até encontrar a solução do problema.

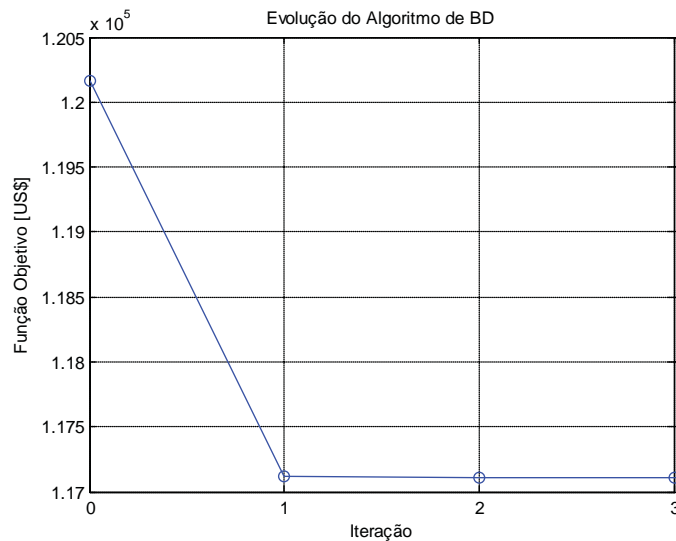


Figura 11: Evolução do algoritmo de BD no sistema de 202 barras.

Os resultados obtidos pela meta-heurística de BD especializada, para os sistemas de 136 e 202 barras são os mesmos que as melhores soluções disponíveis na literatura, como os resultados apresentados por Ribeiro (2013), obtidos usando uma técnica clássica de otimização.

5. Conclusões

O algoritmo de BD utilizado no trabalho desenvolvido mostrou-se eficaz na resolução do PABCSDR, apresentando consideráveis reduções de perdas de energia, o qual encontrou soluções iguais as melhores disponíveis na literatura para os sistemas de 136 e 202 barras. Pode-se dizer que a boa convergência do algoritmo de BD se deu devido a geração do conjunto inicial de soluções de maneira aleatória e controlada, uma vez que ela alocou uma quantidade limitada de bancos de capacitores em cada barra.

No método de combinação das soluções, todas as soluções contidas no CSQ foram re-combinadas duas a duas. A estratégia de recombinação desenvolvida foi muito importante para encontrar soluções de boa qualidade, e evitou dessa forma que o algoritmo utilizado parasse em ótimos locais de baixa qualidade. As soluções recombinaadas foram submetidas ao método de melhoramento de soluções, e desta forma foi feita a exploração na vizinhança das soluções, através de uma busca local sistematizada na tentativa de encontrar uma solução vizinha que tivesse melhor qualidade.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo n° 2014/23741-9, pelo apoio financeiro.

Referências

- Baran, M. E. e Wu, F. F.** (1989), Optimal capacitor placement on radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 1, p. 725–734.
- Boone, G. e Chiang, H. D.** (1993), Optimal capacitor placement in distribution systems by genetic algorithm. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 15, n. 3, p. 155–161.
- Chiang, H. D., Wang, J. C., Cockings, O. e Shin, H. D.** (1990), Optimal capacitor placement in distribution systems, part I: A new formulation and the overall problem. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 2, p. 634–642.
- Chiou, J. P., Chang C. F. e Su, C. T.** (2004), Ant direction hybrid differential evolution for solving large capacitor placement problems. *IEEE Trans. on Power Syst.*, v. 19, n. 4, p. 1794–1800.

- Duran, H.** (1968), Optimum number, location, and size of shunt capacitors in radial distribution feeders – a dynamic programming approach. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-87, n. 9, p. 1769–1774.
- Farahani, V., Sadeghi, S. H. H., Abyaneh, H. A., Agah, S. M. M. e Mazlumi, K.** (2013), Energy loss reduction by conductor replacement and capacitor placement in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 28, n. 3, p. 2077–2085.
- Glover, F.** (1977), Heuristics for integer programming using surrogate constraints. *Decision Sciences*, v. 8, n. 1, p. 156–166.
- Glover, F.** (1998), A template for scatter search and path relinking. *Lecture Notes in Computer Science Artificial Evolution*, Springer, p. 13–54.
- Grainger, J. J. e Civanlar, S.** (1985), Volt/var control on distribution system with lateral branches using shunt capacitors and voltage regulators part I: The overall problem. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104, n. 11, p. 3278–3283.
- Grainger, J. J. e Civanlar, S.** (1985), Volt/var control on distribution system with lateral branches using shunt capacitors and voltage regulators part II: The solution method. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104, n. 11, p. 3284–3290.
- Grainger, J. J. e Civanlar, S.** (1985), Volt/var control on distribution system with lateral branches using shunt capacitors and voltage regulators part III: The numerical results. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 104, n. 11, p. 3291–3297.
- Laguna, M. e Martí, R.**, *Scatter Search: methodology and implementations in C*. Kluwer Academic Publishers, United States of America, 2003.
- Martí, R.** (2006), Scatter Search – wellsprings and challenges. *European Journal of Operational Research*, v. 169, p. 351–358.
- Mekhmer, S. F., El-Hawary, M. E., Mansour, M. M., Moustafa, M. A. e Soliman, S. A.** (2002), State of the art in optimal capacitor allocation for reactive power compensation in distribution feeders, *Large Engineering Systems Conference on Power Engineering 2002*, p. 61–75.
- Rao, S. R., Narasimhamb, S. e Ramalingaraju, M.** (2011), Optimal capacitor placement in a radial distribution system using plant growth simulation algorithm. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 33, n. 5, p. 1133–1139.
- Ribeiro, E. T. A.** (2013), Modelos de programação inteira mista para a alocação ótima de bancos de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica radiais. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista*. 103 f.
- Singh, S. P. e Rao, A. R.** (2012), Optimal allocation of capacitors in distribution systems using particle swarm optimization. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 43, n. 1, p. 1267–1275.
- Shirmohammadi, D., Hong, H. W., Semlyen, A. e Luo, G. X.** (1988), A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. *IEEE Transactions Power Systems*, vol. 3, no. 2, p. 753–762.