

RECONFIGURAÇÃO DE ALIMENTADORES E ALOCAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS USANDO UMA META-HEURÍSTICA MULTIPARTIDA

MÁRCIO M. MONTSUTSUMI, BRUNA P. ALVES, LEONARDO H. MACEDO, RUBÉN ROMERO

*LaPSEE—Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica,
UNESP—Universidade Estadual Paulista*

Avenida Brasil, 56, Centro, 15385-000, Ilha Solteira, SP, Brasil

*E-mails: marcio.montsutsumi@gmail.com, bruna_pardim@yahoo.com.br,
leohfmp@ieee.org, ruben@dee.feis.unesp.br*

Abstract— This paper presents an optimization algorithm that performs the integrated optimization of the reconfiguration and allocation of capacitor banks in radial distribution systems using a multi-start metaheuristic. The objective is to find an optimal operating strategy that minimizes the operating costs of the system over a chosen horizon. Thus, the costs of losses of electric energy and the costs of installation and purchase of capacitor banks should be minimized. In this way, the reconfigured system and with the allocation of fixed and switched capacitor banks allows the system to operate efficiently. The efficiency of the method was tested in the 70-node system, well-known in the specialized literature.

Keywords— Allocation of capacitor banks, loss reduction, multi-start metaheuristic, Prim's algorithm, reconfiguration of distribution systems.

Resumo— Este artigo apresenta um algoritmo de otimização que realiza a otimização integrada da reconfiguração e da alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição radiais utilizando uma meta-heurística multipartida. O objetivo é encontrar uma estratégia ótima de operação que minimize os custos operacionais do sistema em um horizonte escolhido. Assim, devem-se minimizar os custos de perdas de energia elétrica e os custos de instalação e compra de bancos de capacitores. Dessa forma, o sistema reconfigurado e com a alocação de bancos fixos e chaveados permite que o sistema opere de forma eficiente. A eficiência do método foi testada no sistema de 70 barras, muito conhecido na literatura especializada.

Palavras-chave— Algoritmo de Prim, alocação de bancos de capacitores, meta-heurística multipartida, reconfiguração de sistemas de distribuição, redução de perdas.

1 Introdução

A crescente demanda e a necessidade de expansão do sistema de distribuição comprometeram a qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores. Diante disto os órgãos reguladores passaram a avaliar a qualidade do produto e de serviço prestados pelas empresas distribuidoras. O sistema deve operar de forma confiável e econômica, e para isto são aplicadas estratégias de reconfiguração que através de chaveamentos permite isolar regiões defeituosas reduzindo os efeitos sobre o consumidor. Os bancos de capacitores são instalados de forma estratégica para realizar a compensação de potência reativa no sistema, contribuindo na redução de perdas de potência com a elevação do fator de potência e a melhoria nos níveis de tensão em períodos de alta demanda.

Este artigo apresenta uma estratégia de otimização da operação de sistemas de distribuição através da otimização integrada da reconfiguração e da alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição radiais com a utilização de uma meta-heurística baseada no método multipartida. Assim, o problema consiste em reconfigurar um sistema radial base e alocar bancos de capacitores de forma que os custos de operação sejam minimizados para um horizonte de operação escolhido. Deve-se observar que a maioria dos trabalhos de pesquisa realiza apenas a reconfiguração ou a alocação de bancos de capacitores em um sistema de distribuição radial.

O problema da reconfiguração ótima de sistemas de distribuição radiais foi introduzido na literatura especializada na década de 1970, quando foi verificado

ser possível melhorar a operação de sistemas de distribuição radiais por meio da troca de ramos em operação. Sistemas de distribuição apresentam topologia malhada, mas devem operar em configuração radial. Portanto, alguns ramos devem permanecer desativados para que o sistema de distribuição apresente topologia radial. Nesse contexto aparece o problema de reconfiguração ótima de sistemas de distribuição. Assim, dentre as muitas topologias radiais que podem ser geradas em uma rede de distribuição ligeiramente malhada, pretende-se encontrar a topologia radial a qual permite que o sistema opere com perdas mínimas. O número de topologias radiais existentes em sistemas de distribuição reais é muito grande e cresce de forma explosiva com o tamanho do sistema. Na literatura especializada esse tipo de problema é estudado com o uso de heurísticas, meta-heurísticas e técnicas exatas de otimização. Entre as principais contribuições apresentadas na literatura para resolver esse tipo de problema podem ser mencionadas (Carreño, Romero and Padilha-Feltrin, 2008; Mendoza et al., 2006; Chiang and Jean-Jumeau, 1990; Shirmohammadi and Hong, 1989).

Na literatura, o problema de alocação ótima de bancos de capacitores em sistemas de distribuição foi introduzido na década de 1960. Nesse problema, pretende-se instalar bancos de capacitores nas barras do sistema de distribuição de forma a minimizar os custos de operação para um horizonte pré-definido, tipicamente de um ano. Nos custos de operação são considerados os custos de perdas de energia e os custos da compra e instalação de bancos de capacitores fixos ou chaveados. Bancos de capacitores são fontes de potência reativa capacitiva. Portanto, um banco de

capacitores pode fornecer a potência reativa necessária para compensar uma carga indutiva instalada em uma barra do sistema. Caso não existam bancos de capacitores, toda a demanda de potência reativa indutiva deve ser fornecida pelos geradores de grandes usinas através das subestações de distribuição. Desta forma, os bancos de capacitores são estrategicamente instalados nas barras do sistema de distribuição e podem diminuir o módulo da corrente nos ramos do sistema de distribuição (e também nas linhas de transmissão), reduzindo as perdas de potência ativa e, adicionalmente, podem melhorar o perfil de tensão do sistema de distribuição. Assim, as condições de operação são melhoradas e as perdas são minimizadas. Por outro lado, bancos de capacitores dimensionados de forma inadequada ou instalados em barras inadequadas podem piorar as condições de operação (o limite superior do módulo de tensão em uma barra pode ser violado ou mesmo as perdas podem aumentar).

No problema de alocação ótima de bancos de capacitores podem-se adicionar bancos fixos ou chaveados. Nesse contexto, devem-se determinar os tipos de bancos, as barras em que devem ser instalados e a forma de operação dos bancos chaveados, de forma que o sistema minimize os custos de operação. Para resolver esse tipo de problema, na literatura especializada foram empregadas as mesmas técnicas utilizadas para resolver o problema de reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição. Algumas contribuições importantes podem ser encontradas em (Baran and Wu, 1989b). Adicionalmente, deve-se mencionar que resolver o problema de alocação de bancos de capacitores é relativamente mais fácil do que o problema de reconfiguração, porque a topologia inicial já é radial e imutável, especialmente quando se utilizam as meta-heurísticas. Isso significa que para resolver os problemas de fluxo de carga radial de cada proposta de solução, o processo de renumeração de barras é realizado uma única vez. Os bancos de capacitores fixos trabalham de forma permanente no sistema de distribuição e os bancos de capacitores chaveados podem ser desligados para determinados níveis de operação da carga, especialmente para cargas leves. Portanto, para cada nível de operação do sistema, o processo de otimização também deve determinar o estado de operação ligado ou desligado para cada banco de capacitores chaveados.

O problema de otimização da operação de sistemas de distribuição realizando, de forma integrada, a reconfiguração e a alocação de bancos de capacitores é um tipo de problema de otimização ainda pouco explorado na literatura especializada (Guimarães, Castro and Romero, 2010; Farahani, Vahidi and Abyaneh, 2012). Alguns dos trabalhos que utilizam heurísticas e meta-heurísticas para resolver o problema de reconfiguração com alocação simultânea de bancos de capacitores são: (Chang, 2008) que apresenta um algoritmo de colônia de formigas, (Peponis, Papadopoulos and Hatziaargyriou, 1996) que apresenta uma heurística especializada, e (Venkatesh and Ranjan, 2006) que apresenta um algoritmo de programação evolutiva com lógica *fuzzy*. Outros trabalhos como (Lee and Brooks, 1988; Jiang and Baldick, 1996; Zhang, Fu and Zhang, 2008) consideram o problema de

reconfiguração com o controle simultâneo da operação de bancos de capacitores, mas sem considerar a instalação de novos bancos de capacitores no sistema.

Nesse caso, pretende-se implementar de forma integrada ambas as estratégias de forma a minimizar os custos de operação em um horizonte de operação e os custos de compra e instalação de bancos de capacitores. Esse problema também é considerado como sendo de planejamento da operação já que a instalação de bancos de capacitores pode ser realizada de forma simples e rápida. Neste trabalho esse tipo de problema é resolvido usando a meta-heurística multipartida.

2 Reconfiguração e Alocação de Bancos de Capacitores de Forma Integrada

O problema de otimização integrada da reconfiguração e da alocação de bancos de capacitores é apresentado de forma literal, já que esse problema é resolvido por uma meta-heurística. Portanto, não é necessário apresentar os modelos matemáticos, que são relativamente complexos.

O problema consiste em minimizar os custos operacionais para um horizonte de operação do sistema de distribuição através da reconfiguração dos ramos do sistema de distribuição e alocando bancos de capacitores fixos e chaveados, além de cumprir com todas as restrições físicas e operacionais. Assim, a função objetivo apresenta duas parcelas: a primeira representa os custos de perdas elétricas e a segunda representa o custo de instalação e compra de bancos de capacitores. As restrições devem estar representadas pelas leis naturais, isto é, o cumprimento das duas leis de Kirchhoff e das restrições físicas nos equipamentos do sistema de distribuição, isto é, os limites de corrente elétrica nos condutores e do módulo de tensão nas barras do sistema. Assim, neste trabalho, é usada de forma explícita apenas a função objetivo expressa pela equação (1).

$$v = K_e \sum_{i=0}^2 T_i P_i + K_c n_{bc} + K_f n_{bf} + K_a n_a \quad (1)$$

Na relação (1), K_e é o custo da energia (US\$ 0,06/kWh), T_i é o tempo de operação do sistema (em horas) no horizonte de um ano para o nível carregamento i , P_i representa as perdas totais de potência ativa no nível de carregamento i , sendo que nos testes foram considerados três níveis de carregamento, K_c é o custo de um banco chaveado (US\$ 1200,00), n_{bc} é o número de bancos de capacitores chaveados alocados no sistema, K_f é o custo de um banco de capacitores fixo (US\$ 900,00), n_{bf} é o número de bancos fixos alocados no sistema, K_a é o custo de instalação de bancos de capacitores em cada barra (US\$ 1000,00) e n_a é o número de barras com bancos alocados.

Adicionalmente, para avaliar a qualidade de cada proposta de solução apresentada pela meta-heurística devem-se resolver vários problemas de fluxo de carga

para sistemas radiais, isto é, um problema de fluxo de carga para cada nível de demanda do sistema de distribuição. Após resolver esses problemas, deve-se encontrar o valor da função objetivo e verificar a operação factível dessa proposta de solução. Neste trabalho, as propostas que violam o limite de tensão são descartadas e não são armazenadas. Deve-se observar que se trata de um problema de otimização da operação em que, em princípio, a topologia inicial já deve ser factível e, portanto, não faz sentido armazenar propostas de solução infactíveis.

3 A Meta-Heurística Multipartida

A meta-heurística multipartida está sendo muito usada na otimização de problemas da área de pesquisa operacional, mas ainda é pouco usada na otimização de problemas de sistemas de energia elétrica. A principal característica dessa meta-heurística está na forma que ela realiza a busca no espaço de busca do problema. Enquanto meta-heurísticas como *tabu search* parte de uma única solução inicial, encontra novas soluções e realiza transições até cumprir o critério de parada, a meta-heurística multipartida gera uma solução inicial de forma eficiente, melhora essa solução através de uma busca local, geralmente rápida, e repete a mesma estratégia gerando novas soluções iniciais diferentes. Esse processo é repetido até que um critério de parada seja cumprido. Assim, a meta-heurística multipartida assume a seguinte forma:

1. *Fase de pré-processamento*: usar conhecimento específico do problema para diminuir o espaço de busca do problema;
2. *Fase construtiva*: Gerar uma solução inicial diferente de forma eficiente e com boa qualidade;
3. *Fase de melhoria local*: Melhorar a solução gerada no passo 2 usando uma estratégia de busca local;
4. Repetir os passos 2 e 3 até que o critério de parada seja satisfeito. A melhor solução encontrada representa a solução obtida pela meta-heurística.

O desempenho da meta-heurística multipartida depende da forma em que cada etapa é implementada para um problema específico. Assim, na sequência apresenta-se a forma de implementação dessa meta-heurística na otimização da operação de sistemas de distribuição pela reconfiguração e a alocação de bancos de capacitores. Detalhes sobre a teoria do método de multipartida podem ser encontrados em (Martí, Resende and Ribeiro, 2013; Nguyen, Prins and Prodhon, 2012).

4 A Meta-Heurística Multipartida Especializada na Reconfiguração e na Alocação de Bancos de Capacitores

Deve-se mencionar que uma meta-heurística gera e avalia propostas de solução de um determinado

problema. Assim, no problema analisado, a fase construtiva termina quando for gerada uma proposta de solução radial com alocação de bancos de capacitores em algumas barras do sistema elétrico e com a indicação da forma de operação dos bancos chaveados. Como na maioria das publicações sobre alocação de bancos de capacitores, neste trabalho, considera-se que o sistema opera em três níveis de carregamento (leve, normal e pesado). Portanto, para cada proposta de solução gerada, deve-se verificar se essa proposta é factível ou infactível e a qualidade dessa proposta de solução. No problema analisado, essa verificação é realizada através da solução de um problema de fluxo de carga radial para cada proposta de solução. Neste trabalho foi usado o método de fluxo de carga radial de varredura, amplamente usado para esse tipo de problema (Shirmohammadi et al., 1988). Adicionalmente, na fase de busca local são geradas soluções vizinhas da solução corrente. Essas soluções vizinhas são geradas a partir de topologias radiais vizinhas com ligeiras mudanças na alocação de bancos de capacitores na solução corrente. Assim, a factibilidade e a qualidade de cada solução vizinha são avaliadas após a solução de um problema de fluxo de carga radial.

Para o problema analisado a fase de pré-processamento se limita apenas a identificar os ramos do sistema de distribuição que não geram laços se todos os ramos se encontram fechados. Portanto, esses ramos sempre fazem parte das soluções radiais geradas.

Na fase construtiva, uma solução inicial de boa qualidade é gerada de forma construtiva pelo algoritmo de Prim, e na fase de melhoria local, esta solução é melhorada.

A estratégia para gerar topologias radiais diferentes e de boa qualidade usa conhecimento específico do problema. Desde o trabalho pioneiro apresentado em (Merlin e Back, 1975), sabe-se que a topologia malhada (com todos os ramos fechados) geralmente apresenta as menores perdas. Assim, uma topologia radial de boa qualidade é aquela topologia radial que produz a menor mudança na distribuição de fluxos em relação à topologia totalmente malhada. Por esse motivo, Merlin e Back sugeriram retirar os ramos com menores fluxos, um por vez, sem desconectar o sistema, para obter uma topologia radial de boa qualidade. Uma forma alternativa de gerar uma topologia radial de boa qualidade, inspirada na lógica de Merlin e Back, consiste em usar os valores de fluxo de potência aparente da rede malhada como pesos e encontrar uma topologia radial usando o algoritmo de Prim para a geração da árvore máxima. Dessa forma, o algoritmo de Prim prioriza a alocação dos ramos de maior fluxo na formação de uma topologia radial. Essa proposta foi usada neste trabalho. Para isso foi resolvido, uma única vez, um problema de fluxo de carga malhado do sistema de distribuição completo usando também a proposta apresentada em (Shirmohammadi et al., 1988) que permite resolver o problema de fluxo de carga de sistemas de distribuição fracamente malhados. Os valores de fluxo de potência ativa encontrados foram usados como pesos ideais pelo algoritmo de Prim já que se espera diminuir os fluxos de potência reativa com a alocação dos bancos de capacitores e,

por esse motivo, pode não ser adequado usar os fluxos de potência aparente.

Obviamente, aplicando o algoritmo de Prim com esses valores de pesos encontra-se apenas uma topologia radial de boa qualidade. Para gerar uma nova topologia radial de boa qualidade, a estratégia mais adequada é perturbar de forma aleatória os valores desses pesos, por exemplo, 10% em torno do valor conhecido e considerado como sendo ideal. Assim, para cada perturbação gerada nos pesos, o algoritmo de Prim encontra uma nova topologia radial e de boa qualidade. Essa estratégia é usada na fase construtiva para gerar topologias radiais de boa qualidade.

Na fase de melhoria local utiliza-se o algoritmo de busca através de vizinhança (*steepest descent heuristic*–SDH), muito conhecido na literatura especializada. Nessa estratégia é definida a vizinhança da solução corrente e, dessa forma, pode-se identificar a melhor solução vizinha e, nesta solução aplica-se o algoritmo de alocação de bancos de capacitores.

Neste trabalho, para identificar uma solução vizinha e implementar a heurística SDH, considera-se vizinha da solução corrente qualquer topologia radial encontrada fechando-se um ramo de ligação e abrindo-se um ramo fechado que faz laço quando o ramo de ligação é fechado. Um ramo de ligação é um ramo aberto na topologia radial corrente. Assim, fechando-se esse ramo aparece um laço formado pelo ramo de ligação e um conjunto de ramos que estavam fechados na topologia radial. Portanto, a abertura de cada um desses ramos realizados de forma separada gera uma topologia radial vizinha. Esse processo de geração de soluções vizinhas deve ser realizado com todos os ramos de ligação.

A proposta de alocação de bancos de capacitores é executada seguindo dois passos consecutivos e utiliza bancos com capacidade de 300 kVAr. No primeiro passo é realizada a alocação de bancos nas barras terminais candidatas, que possuem o menor nível de tensão. Entretanto, se no nível de carregamento pesado a demanda reativa, na barra candidata, for inferior a 300 kVAr, a demanda desta barra e das adjacentes são acumuladas até que se obtenha 300 kVAr de demanda reativa. Inicia-se então a alocação de bancos de capacitores fixos e chaveados. Os bancos fixos são alocados de maneira permanente nos três níveis de carregamento, enquanto os bancos chaveados são alocados conforme a demanda reativa no carregamento normal e pesado. Dessa forma, ambas as alocações são realizadas se for conveniente para a função objetivo. Na segunda parte, é aplicada a estratégia de retirada de bancos irrelevantes, partindo das barras mais próximas da subestação até as barras terminais. Inicia-se pela retirada de bancos chaveados no carregamento pesado, seguido pelo carregamento normal e se for conveniente são retirados bancos fixos.

Finalmente, deve-se observar que para avaliar a qualidade de cada solução vizinha são resolvidos três problemas de fluxo de carga radial, um para cada nível de carregamento e calculada a função objetivo (1). Adicionalmente, devem-se verificar as restrições operacionais para cada nível de demanda. Dessa forma, são descartadas as soluções vizinhas que apresentam

violações de limites de tensões nas barras ou de corrente nos ramos do sistema de distribuição.

5 Testes e Resultados

Os testes foram realizados para analisar o custo de operação do sistema no período de um ano que opera em três níveis de carregamento (0 Leve; 1 Normal; 2 Pesado), o fator multiplicativo da demanda para cada carregamento ($S_0 = 1,5$; $S_1 = 1,0$ e $S_2 = 1,8$), o tempo de operação do sistema em cada nível de carregamento–em horas ($T_0 = 1000$; $T_1 = 6760$ e $T_2 = 1000$), o custo da energia elétrica $K_e = 0,06$ (US\$/kWh), o custo de infraestrutura para instalar bancos de capacitores em uma barra é igual a $K_a = 1000$ (US\$/barra), o custo de um banco de capacitor fixo de 300 kVAr é igual a $K_f = 900$ US\$, o custo de um banco de capacitores chaveados de 300 KVAR é igual a $K_c = 1200$ US\$, o número máximo de iterações foi fixado em 100 e a perturbação de pesos em $\pm 10\%$ dos pesos ideais. A função objetivo é apresentada na relação US\$/1000.

A meta-heurística multipartida foi testada usando os dados do sistema de 70 barras, muito usado na literatura especializada (Baran and Wu, 1989a; Baran and Wu 1989b; Guimarães, Castro and Romero, 2010). A topologia base desse sistema é mostrada na Figura 1. Ele possui cinco chaves de interconexão normalmente abertas (caso base) que desconectam os ramos 70, 71, 72, 73 e 74 que ligam as barras 12-44, 14-22, 16-47, 51-60 e 28-66 respectivamente. A tensão de operação é de 12,66 kV. A tensão máxima considerada é de 1,05 p.u. e a tensão mínima de 0,90 p.u.

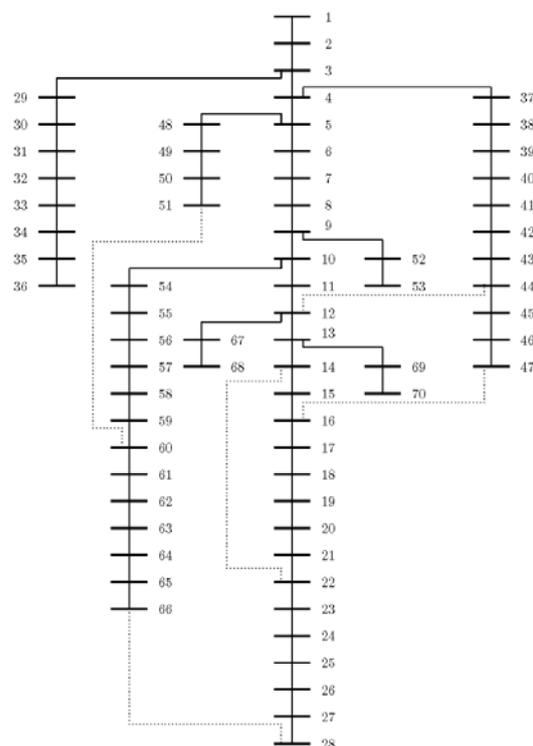


Figura 1. Sistema 70 barras–caso base

No caso base, as perdas de potência ativa nos níveis de carregamento (leve, normal e pesado) e a função objetivo são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados–Caso Base

Configuração inicial (Ramos abertos) 70, 71, 72, 73, 74	FO (\$/1000) 146,52
Nível de carregamento (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas (kW)
Leve	51,6430
Normal	225,1777
Pesado	868,1802

Inicialmente a função objetivo da topologia base é calculada considerando apenas as perdas, isto é, sem reconfiguração e sem alocação de bancos de capacitores. Os níveis de tensão nas barras do sistema também são analisados. A magnitude e a localização dos níveis de tensão (em p.u.) mais críticos do sistema são mostrados na Tabela 2. Deve-se observar que a tensão mínima em carga pesada é muito baixa mostrando uma operação ineficaz.

Tabela 2. Tensões Críticas do Sistema–Caso Base

Barra com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Normal		Pesado	
Barra	V (p.u.)	Barra	V (p.u.)	Barra	V (p.u.)
66	0,9566	66	0,9089	66	0,8195

Na fase construtiva, o sistema é reconfigurado com a aplicação do algoritmo de Prim e as chaves de interconexão dos ramos 14, 21, 62, 70 e 73 são abertas. As perdas de potência ativa e a função objetivo do sistema reconfigurado são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados–Fase Construtiva–Reconfigurado

Configuração corrente (Ramos abertos) 14, 21, 62, 70, 73	FO (\$/1000) 109,70
Nível de carregamento (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas (kW)
Leve	40,0783
Normal	171,3450
Pesado	629,9410

Os níveis de tensão críticos do sistema e a suas localizações são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Tensões Críticas do Sistema–Reconfigurado

Barra com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Normal		Pesado	
Barra	V (p.u.)	Barra	V (p.u.)	Barra	V (p.u.)
61	0,9651	61	0,9274	61	0,8598

Na fase de melhoria local o sistema reconfigurado foi submetido ao procedimento de busca local através de vizinhança. O sistema resultante reconfigurado

com alocação de bancos de capacitores é mostrado na Tabela 5.

Os resultados encontrados pela meta-heurística multipartida mostram um desempenho adequado. Na solução final aparecem fechados três ramos que inicialmente se encontravam abertos na topologia base (ramos 72, 73 e 74). Assim, os ramos 15, 59, 62, 70 e 71 se encontram abertos na topologia final, isto é, os ramos que ligam as barras 15-16, 59-60, 62-63, 12-44 e 14-22 respectivamente. Adicionalmente, foram instalados dois bancos de capacitores fixos na barra 62 e um banco de capacitores fixos na barra 65. Também foi instalado um banco de capacitores chaveados na barra 65 que opera em carga normal e pesado, mas deve ser desligado em carga leve. Finalmente, deve-se observar que foram alocados bancos de capacitores, fixos e chaveados, em apenas duas barras já que o custo de 1000 dólares para instalação de infraestrutura para alocar bancos desestimula escolher novas barras vizinhas para alocação de bancos.

Tabela 5. Resultados–Solução Final

Configuração final (Ramos abertos) 15, 59, 62, 70, 71	FO (\$/1000) 50,21
Nível de carregamento (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas (kW)
Leve	17,3212
Normal	67,8678
Pesado	262,3660
Capacitores fixos 300 kVAr	Barra (nº de bancos) 62 (2), 65 (1)
Capacitores chaveados 300 kVAr	Barra (nº de bancos) 65 (0,1,1)

Ao final do procedimento aplicado, os resultados obtidos são comparados aos dados do caso base. Assim, nota-se que o sistema analisado apresentou redução de 65,7% no custo de operação e o nível de tensão mais crítico do sistema aumentou em 11,6%. Em outras palavras, os custos de operação passaram de 146,52 US\$ para 50,21 US\$ representando uma redução de 96 mil US\$ por ano. A proposta foi integralmente programada em linguagem de programação Fortran e os testes foram realizados usando um computador Intel® Core™ i5 de 2,5 GHz e 8 GB de RAM. Dessa forma, um teste típico para o sistema de 70 barras foi resolvido em 4 segundos.

Tabela 6. Tensões Críticas do Sistema–Final

Barra com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Normal		Pesado	
Barra	V (p.u.)	Barra	V (p.u.)	Barra	V (p.u.)
61	0,9858	61	0,9641	61	0,9151

6 Conclusões

Este trabalho apresentou a aplicação de uma meta-heurística baseada na estratégia multipartida para

reconfigurar e alocar bancos de capacitores em sistemas de distribuição radiais com a finalidade de obter um sistema com menor custo de operação. A aplicação do algoritmo de Prim para gerar uma solução de boa qualidade que é melhorada na fase de melhoria local pelo procedimento de busca em vizinhança mostrou desempenho adequado. Adicionalmente, o processo de identificação das barras com níveis de tensão críticas para que seja aplicado o algoritmo de alocação de bancos de capacitores contribuiu para a redução das perdas de potência ativa e do custo de operação do sistema.

A estratégia multipartida que é caracterizada pela repetição, a cada iteração foi capaz de gerar, de forma rápida, uma solução de boa qualidade a partir de diferentes pontos de partida. A variação do ponto de partida foi possível pela variação dos pesos dos ramos, que ao aplicar o algoritmo de Prim é dado um ponto de partida para a construção da solução final. Assim, para o sistema testado a proposta de otimização apresentou um bom desempenho.

Agradecimentos

Este trabalho recebeu apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), proc. n.º 2014/23741-9 e 2015/21972-6.

Referências Bibliográficas

- Baran, M. E. and Wu, F. F. (1989a). Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 2, pp. 1401–1407.
- Baran, M. E. and Wu, F. F. (1989b). Optimal capacitor placement on radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 1, pp. 725–734.
- Carreño, E. M.; Romero, R. and Padilha-Feltrin, A. (2008). An efficient codification to solve distribution network reconfiguration for loss reduction problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No. 4, pp. 1542–1551.
- Chang, C.-F. (2008). Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution systems by ant colony search algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No. 4, pp. 1747–1755.
- Chiang, H. D. and Jean-Jumeau, R. (1990). Optimal network reconfiguration in distribution systems: II. Solution algorithms and numerical results. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 3, pp. 1568–1574.
- Farahani, V.; Vahidi, B. and Abyaneh, H. A. (2012). Reconfiguration and capacitor placement simultaneously for energy loss reduction based on an improved reconfiguration method. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 27, No. 2, pp. 587–595.
- Guimarães, M. A. N.; Castro, C. A. and Romero, R. (2010). Distribution systems operation optimisation through reconfiguration and capacitor allocation by a dedicated genetic algorithm. *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 4, No. 11, pp. 1213–1222.
- Jiang, D. and Baldick, R. (1996). Optimal electric distribution system switch reconfiguration and capacitor control. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 11, No. 2, pp. 890–897.
- Lee, R. E. and Brooks, C. L. (1988). A method and its application to evaluate automated distribution control. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, No. 3, pp. 1232–1240.
- Martí, R.; Resende, M. G. C. and Ribeiro, C. C. (2013). Multi-start methods for combinatorial optimization. *European Journal of Operational Research*, Vol. 226, No. 1, pp. 1–8.
- Mendoza, J.; Lopez, R.; Morales, D.; Lopez, E.; Desante, P. and Moraga, R. (2006). Minimal loss reconfiguration using genetic algorithms with restricted population and addressed operators: real applications. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 21, No. 2, pp. 948–954.
- Merlin, A. and Back, H. (1975). Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system. In: *Power System Computation Conference, Proceedings...* Zurich: PSCC, pp. 1–18.
- Nguyen, V. P.; Prins, C. and Prodhon, C. (2012). A multi-start iterated local search with tabu list and path relinking for the two-echelon location-routing problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 25, No. 1, pp. 56–71.
- Peponis, G. J.; Papadopoulos, M. P. and Hatziargyriou, N. D. (1996). Optimal operation of distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 11, No. 1, pp. 59–67.
- Shirmohammadi, D., Hong, H. W., Semlyen, A. and Luo, G. X. (1988). A Compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 3, No. 2, pp. 753–762.
- Shirmohammadi, D. and Hong, H. W. (1989). Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 2, pp. 1492–1498.
- Venkatesh, B. and Ranjan, R. (2006). Fuzzy EP algorithm and dynamic data structure for optimal capacitor allocation in radial distribution systems. *IEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 153, No. 1, pp. 80–88.
- Zhang, D.; Fu, Z. and Zhang, L. (2008). Joint optimization for power loss reduction in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No. 1, pp. 161–169.