LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
Limeira–SP, 02 a 06 de setembro de 2019

BUSCA TABU REFORMULADA PARA RESOLVER O PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO E ALOCAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Bruna Pardim Alves
bruna.pardim@gmail.com

Leonardo H. Macedo
leohfmp@ieee.org

Rubén Romero
ruben.romero@unesp.br

Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica – LaPSEE
Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira
Avenida Brasil, 56, Centro, Ilha Solteira-SP, CEP 15385-000

RESUMO

Este artigo apresenta um algoritmo reformulado baseado na meta-heurística de Busca Tabu para resolver de forma simultânea os problemas de reconfiguração e alocação ótima de bancos de capacitores fixos em sistemas de distribuição de energia elétrica. Na formulação foram desenvolvidas estratégias de geração da solução inicial utilizando o algoritmo de Prim e uma heurística para alocar bancos de capacitores. A partir dessa solução inicia-se o processo, que considera como solução vizinha uma topologia vizinha da solução radial corrente, com a proposta de alocação de bancos de capacitores modificada. O objetivo é encontrar uma topologia radial com capacitores alocados que minimize os custos de investimento e os custos operacionais em um horizonte escolhido. O método foi testado no sistema de 84 barras, e os resultados indicam que o algoritmo proposto é capaz de encontrar soluções de boa qualidade para o problema abordado.

PALAVRAS CHAVE. Alocação de bancos de capacitores. Busca tabu. Reconfiguração de sistemas de distribuição.

EN&PG – PO na Área de Energia, Petróleo e Gás

ABSTRACT

This paper presents a reformulated algorithm based on the Tabu Search meta-heuristic to simultaneously solve the problem of reconfiguration and optimal allocation of fixed capacitor banks in electric power distribution systems. In the formulation, strategies were developed to generate the initial solution using the Prim algorithm and a heuristic to allocate capacitor banks. Using the solution found, the process begins, which considers as a neighbor solution a neighboring topology of the current radial topology with a modified proposal for the allocation of capacitor banks. The objective is to find a radial topology with allocated capacitor banks that minimizes the investment and operating costs for a chosen horizon. The method was tested in the 84-node system, and the results indicate that the proposed algorithm is able to find good-quality solutions for the problem.

KEYWORDS. Allocation of capacitor banks. Tabu search. Reconfiguration of distribution systems.

EN&PG – OR Area of Energy, Oil, and Gas

https://proceedings.science/p/106666?lang=pt-br

1. Introdução

O aumento na demanda de energia elétrica leva à necessidade de expansão do sistema de distribuição e isso pode resultar em uma diminuição da qualidade da energia elétrica que é fornecida aos consumidores. Para que o sistema de distribuição passe a operar de modo econômico e confiável é preciso desenvolver estratégias de planejamento e operação da rede. As perdas nos sistemas de distribuição não fornecem lucro para as empresas distribuidoras e é um dos fatores que levam a avaliar algumas dessas estratégias, como alterar a topologia da rede, ou seja, reconfigurá-la através de chaveamentos em pontos considerados estratégicos. Reconfigurar a rede também permite isolar regiões defeituosas e reduzir os períodos de desligamentos. Outros problemas, como níveis de tensão ruins em períodos de alta demanda e baixo fator de potência no sistema, podem ser resolvidos com a instalação estratégica de bancos de capacitores que realizam a compensação de potência reativa no sistema.

Este artigo apresenta uma estratégia para melhorar a operação de sistemas de distribuição através de um método integrado de reconfiguração e alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica radiais utilizando uma meta-heurística baseada em Busca Tabu, nomeada de Busca Tabu Reformulada. O propósito é reconfigurar um sistema radial base e utilizando o sistema reconfigurado, alocar os bancos de capacitores de forma a minimizar os custos de operação para um horizonte escolhido.

Vale ressaltar que a maioria dos trabalhos de pesquisa trata apenas sobre a reconfiguração ou apenas sobre alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição radiais, sendo que poucos realizam a otimização de ambos problemas de forma integrada.

O problema da reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica se resume em encontrar uma topologia radial por meio da troca de ramos que estão em operação. Os sistemas de distribuição devem operar de forma radial, e por apresentarem topologia malhada alguns ramos devem ser desconectados. Logo, deve-se encontrar dentre as várias topologias radiais que podem ser geradas, uma que produza perdas mínimas.

Por ser de origem combinatória, o problema de reconfiguração pode ser formulado como um modelo de programação não linear inteira mista, pois a grande quantidade de topologias radiais possíveis de serem obtidas pode resultar em uma explosão combinatória [Possagnolo, 2015], [Macedo et al., 2018]. Para resolução deste problema são utilizados métodos de otimização clássica ou heurísticas que geram soluções de boa qualidade sem garantia de otimalidade, sendo que os algoritmos mostrados em [Baran e Wu, 1989a], [Shirmohammadi e Hong, 1989] e [Civanlar et al., 1988] são alguns exemplos. O problema também pode ser resolvido fazendo o uso de metaheurísticas como Algoritmo Genético, Tabu Search, GRASP, Simulated Annealing, entre outras, que são métodos muito eficazes para resolver problemas combinatórios. Algumas das principais contribuições apresentadas na literatura para resolver o problema da reconfiguração utilizando metaheurísticas podem ser encontradas em [Mendoza et al., 2006; Carreno et al., 2008; Franco et al., 2012].

No problema de alocação ótima de bancos de capacitores em sistemas de distribuição, pretende-se minimizar os custos de operação e investimento instalando-se bancos de capacitores nas barras do sistema de distribuição. Os bancos de capacitores fornecem potência reativa para compensar as cargas indutivas presentes nas barras de sistemas elétricos.

Existem bancos de capacitores fixos e chaveados. Os bancos fixos ficam constantemente ligados à rede e têm um menor custo, já os chaveados são ligados de acordo com o nível de carregamento do sistema, de forma a manter as magnitudes de tensão nos nós da rede dentro de limites pré-estabelecidos. Para resolver o problema de alocação de bancos de capacitores em sistemas de

distribuição, na literatura são encontradas os mesmos tipos de métodos utilizados para resolver o problema de reconfiguração de alimentadores. Alguns podem ser encontrados em [Baran e Wu, 1989b].

Utilizar as estratégias de reconfiguração em conjunto com a alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição, é um problema ainda pouco abordado na literatura especializada. Algumas contribuições importantes que utilizaram meta-heurísticas para resolver este problema podem ser encontrados em [Rong et al., 2002], [Kalantar e Dashti, 2006], [Chang, 2008], [Guimarães et al., 2010] e [Montsutsumi et al., 2017]. Uma formulação exata para o problema, de programação cônica de segunda ordem inteira mista é apresentada em [Home-Ortiz et al., 2019].

Neste trabalho o problema integrado de reconfiguração de alimentadores e alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição é resolvido usando um método reformulado baseado na meta-heurística Busca Tabu.

2. O Problema Integrado de Reconfiguração e Alocação de Bancos de Capacitores

Na presença de cargas reativas indutivas elevadas no sistema, a reconfiguração da rede não reduz efetivamente as perdas de energia causadas por fluxos de potência reativa, e somente a alocação de banco de capacitores pode não reduzir as perdas causadas devido às sobrecargas em alguns alimentadores. Por isso, quando a reconfiguração de alimentadores e a alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica são consideradas de maneira integrada, certamente são obtidos melhores resultados do que utilizar apenas uma dessas estratégias [Zhang et al., 2006].

O problema integrado tratado neste artigo consiste em minimizar os custos de investimento e os operacionais para um horizonte de operação do sistema de distribuição através da reconfiguração de alimentadores do sistema de distribuição e alocação de bancos de capacitores fixos, além de cumprir com todas as restrições físicas e operacionais da rede.

A função objetivo utilizada de forma explícita neste trabalho é representada pela relação (1) e avalia o custo das perdas no sistema e o custo de investimento e operação dos bancos de capacitores em que estão incluídos: o custo de instalação de capacitores em cada barra, o custo da compra de bancos fixos e o custo das perdas de potência ativa no período de operação.

$$f_c = K_e \sum_{i=1}^{nc} T_i P_i + K_c n_{bc} + \sum_{j=1}^{n_{cf}} C_{f_j} \tag{1}$$

onde K_e é o custo da energia (0,06 US$/kWh), nc é o número de níveis de carregamento da rede, T_i é o tempo (em horas) de operação do sistema para um horizonte de um ano para o nível de carregamento i, P_i são as perdas de potência ativa no carregamento i, K_c é o custo de instalação de bancos de capacitores por barra (US$ 1000), n_{bc} é a quantidade de barras que receberam bancos de capacitores, C_{f_j} é o custo de um banco de capacitor fixo (US$ 900 para um banco de 300 kVAr) e n_{cf} é a quantidade de bancos de capacitores fixos instalados. Neste trabalho foram considerados três níveis de carregamento (leve, normal e pesado).

3. A Meta-Heurística Busca Tabu

A Busca Tabu, conhecida na literatura por *Tabu Search*, foi proposta por Glover em 1986 [Glover, 1986]. Ela é uma extensão dos métodos clássicos de Busca Local, que podem ser resumidos em buscar uma solução ou um sub-conjunto de soluções dentro de um conjunto de soluções.

O *Tabu Search* básico pode ser visto simplesmente como a combinação de Busca Local com memória de curto prazo. O algoritmo de Busca Tabu com memória de curto prazo é considerado o mais simples e usa uma lista de atributos proibidos e um critério de aspiração em

sua formulação. Apesar de ser vantajoso usar uma lista de atributos proibidos devido à pequena memória utilizada e fácil manipulação e armazenamento, a lista de atributos apresenta desvantagens ao encontrar configurações de excelente qualidade. Este problema pode ser eliminado utilizando o critério de aspiração que consiste em eliminar a proibição do atributo de uma solução vizinha de excelente qualidade por compartilhar o mesmo atributo de uma solução já visitada. Logo se uma solução satisfaz um critério especificado e ela ainda não foi visitada, então elimina-se a proibição e realiza-se a transição para essa solução encontrada.

No algoritmo de Busca Tabu com memória de longo prazo, além da memória de curto prazo é incorporada uma estratégia adicional chamada de estratégia de longo prazo. Três aspectos fundamentais estão relacionados à memória de longo prazo, como a memória baseada em frequência que tem como objetivo guardar a informação do número de vezes em que um atributo foi escolhido para gerar ou participar da composição das configurações durante o processo e pode ser utilizada para penalizar ou incentivar configurações; a estratégia de diversificação, que realiza uma busca mais intensa em torno da solução corrente; e a estratégia de intensificação que sai de uma região do espaço de busca para que, de forma proposital, atinja-se uma região distante, para novamente realizar-se algum processo de intensificação.

Existem também algumas estratégias adicionais como o *path-relinking* que é usado para gerar configurações de qualidade para iniciar um processo de intensificação ou diversificação, e a estratégia de configurações de elite, pode ser usada para gerar configurações atrativas através de *path-relinking* ou também para reiniciar um processo de intensificação.

4. A Meta-Heurística de Busca Tabu Reformulada

Para resolver o problema integrado de reconfiguração de alimentadores e alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica operando em vários níveis de demanda foi utilizado um método baseado na meta-heurística Busca Tabu, nomeada de Busca Tabu Reformulada. O algoritmo de Busca Tabu Reformulada assume a seguinte forma:

1. Passo preliminar: Montar os dados do problema. Escolher uma forma de representação de uma proposta de solução denominada de p. Identificar uma forma de avaliar a qualidade da função objetivo ou equivalente e denominada $f(p)$. Definir a estrutura de vizinhança a ser usada, o que caracteriza o espaço de busca. Escolher o parâmetro k_d que identifica o número de soluções geradas nas últimas k_d transições do algoritmo TS e que devem ser armazenadas para verificar se uma solução vizinha já foi visitada anteriormente. Escolher o parâmetro k_e que identifica o número de soluções de elite que o algoritmo TS deve armazenar. Escolher o critério de parada.

2. Encontrar uma solução inicial p_o que se transforma na solução corrente p_c.

3. Identificar e avaliar todas as soluções vizinhas da solução corrente p_c, ordenar essas soluções vizinhas por qualidade, sendo que a primeira da lista é a melhor solução vizinha p^{best}.

4. Realizar a transição para a solução vizinha melhor classificada desde que essa solução vizinha não se encontra na lista das últimas k_d soluções vizinhas escolhidas no processo de transição e que se encontram armazenadas para verificação de ciclagem. Seja p_e a solução vizinha escolhida, então fazer $p_c = p_e$.

5. Atualizar a lista de soluções de elite e a lista das últimas k_d soluções geradas no processo de transição do algoritmo TS modicado, incorporando a solução vizinha p_e e retirando a proposta de solução mais antiga. Se o critério de parada for satisfeito então pare. Em caso contrário voltar ao passo 3.

Deve-se observar que no algoritmo de Busca Tabu Reformulada não existe lista de atributos proibidos nem critério de aspiração. Assim, o conceito de atributo pode ser eliminado. Essa estratégia é eficiente porque no problema analisado o número de transições é pequeno quando comparado com outros problemas tradicionais de pesquisa operacional.

5. Busca Tabu Reformulada para Reconfiguração e Alocação de Bancos de Capacitores

Nesta seção são descritos todos os passos utilizados pelo Algoritmo de Busca Tabu Reformulada para resolver o problema de operação ótima de sistemas de distribuição radiais através de uma estratégia integrada de reconfiguração e alocação de bancos de capacitores fixos.

Para cada proposta de solução gerada nesse algoritmo, deve-se verificar a qualidade calculando o valor da função objetivo utilizando a relação (1). Essa verificação é realizada através da solução de um problema de fluxo de carga para redes radiais para cada proposta de solução. O método para a solução do problema de fluxo de carga em sistemas radiais utilizado neste trabalho, foi desenvolvido por [Shirmohammadi et al., 1988], e é conhecido como método de varredura.

Inicialmente, para o sistema base resolve-se três problemas de fluxo de carga, um para cada nível de carregamento (leve, normal e pesado). Depois calcula-se a função objetivo que permite avaliar a qualidade da proposta de solução, utilizando-se (2).

$$f = k_e \sum_{i=1}^{nc} T_i P_i \tag{2}$$

A qualidade da proposta de solução inicial é muito importante para se obter um bom desempenho do algoritmo e levá-lo a obter uma solução ótima ou quase ótima de maneira mais rápida. Para gerar uma solução inicial utiliza-se algoritmo de Prim para gerar uma topologia radial e uma estratégia heurística para alocar bancos de capacitores.

5.1. Algoritmo de Prim

Robert C. Prim publicou o algoritmo de Prim em 1957. No problema de reconfiguração de sistemas de energia elétrica o algoritmo é utilizado para encontrar uma árvore geradora máxima que produza perdas mínimas, em que as arestas são chamadas de ramos e o fluxo de potência ativa nos ramos são os pesos. Para obter os fluxos de potência ativa nos ramos do sistema resolve-se um fluxo de carga para sistemas fracamente malhados [Shirmohammadi et al., 1988].

A heurística baseada no algoritmo de Prim para gerar uma solução inicial radial pode ser resumida da seguinte maneira: Com o sistema inicialmente com todas as chaves fechadas e adotando como pesos ideais o fluxo de potência ativa de cada ramo, abra todas as chaves do sistema, (i) marque o nó da subestação, (ii) de todos os ramos que tenham um nó terminal marcado e outro não marcado, escolha o ramo com maior peso e feche a chave, (iii) marque o nó terminal não marcado do ramo que foi escolhido, (iv) se todos os nós estiverem marcados, tem-se uma árvore de peso máximo e, portanto, finaliza-se o processo porque foi encontrada uma topologia radial. Caso contrário, volte ao passo (ii).

Após gerar a topologia radial usando o algoritmo de Prim, resolve-se três problemas de fluxo de carga radial (um para cada nível de carregamento) e calcula-se a função objetivo da proposta de solução encontrada pelo algoritmo de Prim utilizando a relação (2), que considera as perdas de potência ativa no sistema em seus i níveis de carregamento, o tempo de operação (em horas) em cada nível de carga no período de um ano e o custo da energia (em US$/kWh).

5.2. Heurística para Alocação de Bancos de Capacitores

Para cada uma das barras do sistema é testado a alocação de um capacitor fixo de 300 kVAr e calculado o valor da função objetivo utilizando (1).

Ordena-se as barras de acordo com sua função objetivo e com as melhores é feito um algoritmo heurístico construtivo (AHC) para encontrar a melhor configuração radial inicial com alocação de capacitores fixos.

Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC)

Inicialmente é alocado um capacitor fixo de 300 kVAr na barra mais interessante escolhida anteriormente e a função objetivo se torna a função objetivo corrente (fo_{inc}). As etapas do algoritmo são as seguintes:

(i) Simular a adição de um capacitor fixo de 300 kVAr de forma independente para cada barra da lista de barras interessantes, calcular um FC para cada nível de carregamento em cada caso. Identificar a barra mais promissora para alocar um banco de capacitores cuja função objetivo é (fo_c). Se fo_c for melhor que fo_{inc}, então adicionar o banco nessa barra, fazer fo_{inc} = fo_c e ir ao passo 2. Se não, pare o processo porque foi encontrado um ótimo local que é a solução inicial para iniciar o processo de Busca Tabu Reformulada.

(ii) Voltar ao passo (i) com a nova topologia corrente para tentar adicionar um novo banco de capacitores.

5.3. Representação da Topologia Radial com Alocação de Capacitores

Após aplicar o algoritmo de Prim e a heurística para alocação de bancos de capacitores fixos, obtém-se uma solução inicial radial com bancos de capacitores instalados, que pode ser representada por um vetor de tamanho $nl + nb$, onde nl é o número de ramos abertos do sistema e nb é o número de barras. Dessa forma, as nl primeiras posições do vetor de solução contém a numeração dos ramos cujas chaves estão abertas. Nas seguintes nb posições se indicam o número de bancos fixos que estão operando em cada barra.

5.4. Estrutura de Vizinhança

Uma solução vizinha é uma topologia radial vizinha da topologia radial corrente e com a proposta de alocação de bancos modificada. Essa solução vizinha é encontrada da seguinte forma:

- A topologia radial vizinha deve ser diferente da topologia radial corrente com apenas a abertura de um ramo e o fechamento de outro ramo e preservando a radialidade da proposta de solução.
- Na mudança na alocação de bancos de capacitores devem ser implementadas as seguintes estratégias: (i) deslocamento de alocação de bancos de uma barra para uma barra vizinha, (ii) adicionar um banco em uma barra em que já existem bancos instalados, (iii) retirar um banco de uma barra em que já existem bancos instalados, e (iv) adicionar bancos em uma lista reduzida de barras consideradas atrativas.

6. Testes e Resultados

Os algoritmos desenvolvidos foram escritos em linguagem de programação Fortran e todos os testes foram feitos utilizando um computador com processador Intel®Core™i7-7500U de 2,70 GHz e 8 GB de RAM.

Os testes foram realizados para analisar o custo de operação do sistema no período de um ano que opera em três níveis de carregamento (1-Leve; 2-Normal; 3-Pesado), os fatores de demanda para os níveis de carregamento são $S_1 = 0,5$; $S_2 = 1,0$ e $S_3 = 1,8$, os tempos de operação do

sistema em cada nível de carregamento em horas são $T_1 = 1000$; $T_2 = 6760$ e $T_3 = 1000$, o custo da energia elétrica $K_e = 0,06$ (US$/kWh), o custo da infraestrutura para instalar bancos de capacitores em uma barra é igual a $K_c = 1000$ (US$/barra), e são instalados bancos de 300 kVAr. Um banco de 300 kVAr fixo custa US$ 900. O valor da função objetivo é apresentado na relação $/1000 e o número máximo de iterações foi fixado em 300. O tamanho da lista k_d foi fixado em 120 e o tamanho da lista k_e foi fixado em 20.

O sistema utilizado para teste da meta-heurística Busca Tabu Reformulada é o sistema de 84 barras apresentado em [Chiou et al., 2005]. Na Figura 1 ilustra-se a topologia base desse sistema, ele possui treze chaves de interconexão normalmente abertas (caso base) que desconectam os ramos 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95 e 96 que ligam as barras 5-55, 7-60, 11-43, 12-72, 13-76, 14-18, 16-26, 20-83, 28-32, 29-39, 34-46, 40-42 e 53-64 respectivamente. A potência base é 100.000 kVA e a tensão na subestação é 11,4 kV.

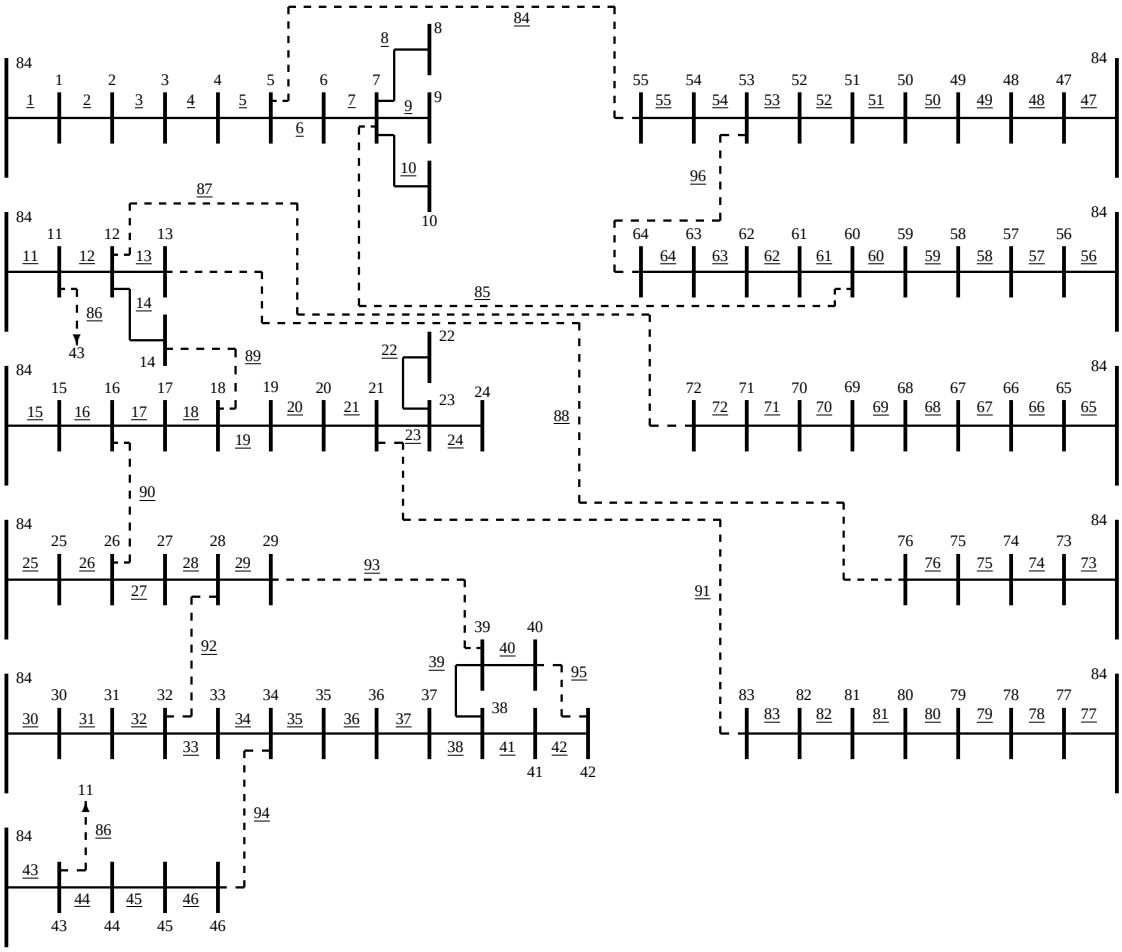

Figura 1: Sistema de 84 barras

No estado inicial do sistema (caso base), a Tabela 1 apresenta as perdas de potência ativa nos três níveis de carregamento (leve, normal e pesado) e a função objetivo.

Tabela 1: Resultados do sistema de 84 barras – caso base

Configuração inicial (ramos abertos)	**FO (US$/1000)**
84, 85, 86, 87, 88, 89, 90 91, 92, 93, 94, 95 e 96	335,7174
Nível de carregamento (0,5; 1,0; 1,8)	**Perdas (kW)**
Leve	127,2127
Normal	531,9966
Pesado	1871,7810

A barra e o menor nível de tensão em cada nível de carregamento do caso base são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Barras com menor tensão – caso base (sistema de 84 barras)

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		**Normal**		**Pesado**	
Barra	V (p.u.)	Barra	V (p.u.)	Barra	V (p.u.)
9	0,9657	9	0,9285	9	0,8948

Inicialmente, são consideradas apenas as perdas para o cálculo da função objetivo da topologia base, isto é, não é feita reconfiguração e nem alocação de bancos de capacitores. Com a aplicação do algoritmo de Prim o sistema é reconfigurado e as chaves de interconexão dos ramos 7, 33, 39, 42, 63, 72, 82, 84, 86, 88, 89, 90 e 92 são abertas. Na Tabela 3 são mostradas as perdas de potência ativa e a função objetivo do sistema reconfigurado.

Tabela 3: Resultados sistema de 84 barras – reconfigurado

Configuração corrente (ramos abertos)	**FO (US$/1000)**
7, 33, 39, 42, 63, 72, 82 84, 86, 88, 89, 90 e 92	295,8587
Nível de carregamento (0,5; 1,0; 1,8)	**Perdas (kW)**
Leve	113,7731
Normal	471,7258
Pesado	1628,3380

Após reconfigurar o sistema utilizando o algoritmo de Prim, nota-se que a nova topologia apresentou redução das perdas de potência ativa em todos os níveis de carregamento e ocasionou uma redução da função objetivo. Para este caso, a barra e o menor nível de tensão em cada carregamento são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Barras com menor tensão – Prim (sistema de 84 barras)

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		**Normal**		**Pesado**	
Barra	V (p.u.)	Barra	V (p.u.)	Barra	V (p.u.)
9	0,9765	9	0,9518	9	0,9304

Na próxima etapa, após fazer a seleção das dez melhores barras, submete-se o sistema reconfigurado à uma heurística para alocação de bancos de capacitores fixos, a qual encontra uma solução inicial de boa qualidade. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Proposta de solução inicial (sistema de 84 barras) – reconfigurada e com alocação de capacitores fixos

Configuração inicial (ramos abertos)	**FO (US$/1000)**
7, 33, 39, 42, 63, 72, 82 84, 86, 88, 89, 90 e 92	276,9984
Nível de carregamento (0,5; 1,0; 1,8)	**Perdas (kW)**
Leve	106,1714
Normal	410,5011
Pesado	1458,8140
Capacitores fixos	**Barra (número de bancos)**
300 kVAr	9(3), 10(1), 21(5), 71(5)

A barra e o menor nível de tensão em cada nível de carregamento após o sistema ser submetido à heurística são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6: Barras com menor tensão – solução inicial (sistema de 84 barras)

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		**Normal**		**Pesado**	
Barra	V (p.u.)	Barra	V (p.u.)	Barra	V (p.u.)
55	0,9794	55	0,9577	55	0,9393

Com a proposta de solução inicial obtida e considerando que a lista reduzida utilizada pela vizinhança contém 50 barras consideradas atrativas, que são escolhidas da mesma maneira que na heurística para alocação de bancos de capacitores, submete-se o sistema ao algoritmo de Busca Tabu Reformulada. Na Tabela 7 é mostrado o sistema resultante reconfigurado e com alocação de bancos de capacitores.

Tabela 7: Resultados sistema de 84 barras – solução final

Configuração final (ramos abertos)	**FO (US$/1000)**
7, 34, 38, 42, 63, 72, 83, 84, 86, 88, 89, 90 e 92	257,1328
Nível de carregamento (0,5; 1,0; 1,8)	**Perdas (kW)**
Leve	89,1618
Normal	332,2394
Pesado	1262,1140
Capacitores fixos	**Barra (número de bancos)**
300 kVAr	6(3), 7(4), 13(4), 20(6), 28(4), 53(6), 71(5), 79(5)

Na Tabela 8 são apresentados o menor nível de tensão e sua respectiva barra em cada nível de carregamento da solução final.

Tabela 8: Barras com menor tensão – solução final (sistema de 84 barras)

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		**Normal**		**Pesado**	
Barra	V (p.u.)	Barra	V (p.u.)	Barra	V (p.u.)
76	0,9912	9	0,9759	9	0,9557

Para o sistema de 84 barras, a meta-heurística de Busca Tabu Reformulada foi capaz de reduzir as perdas de potência ativa nos três níveis de carregamento e, apesar dos custos de investimento em capacitores, o custo de operação do sistema foi reduzido em 23,4% se comparado com estado inicial do sistema. Em outras palavras, os custos de operação passaram de 335,72 (US$/1000) para 257,13 (US$/1000) o que representa uma redução de US$ 78,6 mil por ano. O tempo computacional para resolver o problema foi de 78,59 segundos.

7. Conclusões

Este artigo apresentou a aplicação de um algoritmo baseado na meta-heurística de Busca Tabu, denominada de Busca Tabu Reformulada para otimizar a operação de um sistema de distribuição radial através de uma estratégia que, de forma simultânea, faz a reconfiguração e a alocação de bancos de capacitores.

A vantagem da Busca Tabu Reformulada apresentada é que não existem dúvidas se uma proposta de solução vizinha foi visitada anteriormente com uma margem de segurança muito grande. As desvantagens são a necessidade de verificar se uma proposta de solução já foi visitada anteriormente e a memória necessária para o armazenamento das soluções já visitadas. Com o teste foi mostrado que essas desvantagens não representam problemas no tema de pesquisa abordado. Dessa forma, o algoritmo pôde diminuir os custos devido às perdas que compensa o custo pela compra e instalação de bancos de capacitores e ainda pode gerar um lucro para a empresa distribuidora.

O algoritmo de Busca Tabu Reformulada mostrou-se capaz de gerar soluções de boa qualidade para os sistemas testados exigindo pouco tempo de processamento. No teste para o sistema de 84 barras é possível observar a redução dos custos de operação do sistema e a redução das perdas de potência ativa nos três níveis de carregamento. Assim, para o sistema testado a proposta de otimização apresentou um bom desempenho.

8. Agradecimentos

Este trabalho recebeu apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo 305852/2017-5, e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processos 2015/21972-6 e 2018/20355-1.

Referências

Baran, M. E. e Wu, F. F. (1989a). Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(2):1401–1407.

Baran, M. E. e Wu, F. F. (1989b). Optimal capacitor placement on radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(1):725–734.

Carreno, E. M., Romero, R., e Padilha-Feltrin, A. (2008). An efficient codification to solve distribution network reconfiguration for loss reduction problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(4):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*, 23(4):1747–1755.

Chiou, J.-P., Chang, C.-F., e Su, C.-T. (2005). Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(2):668–674.

Civanlar, S., Grainger, J., Yin, H., e Lee, S. (1988). Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(3):1217–1223.

Franco, J. F., Lavorato, M., Rider, M. J., e Romero, R. (2012). An efficient implementation of tabu search in feeder reconfiguration of distribution systems. In *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, p. 1–8. IEEE.

Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research*, 13(5):533–549.

Guimarães, M., Castro, C., e Romero, R. (2010). Distribution systems operation optimisation through reconfiguration and capacitor allocation by a dedicated genetic algorithm. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 4(11):1213–1222.

Home-Ortiz, J. M., Vargas, R., Macedo, L. H., e Romero, R. (2019). Joint reconfiguration of feeders and allocation of capacitor banks in radial distribution systems considering voltage-dependent models. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 107:298–310.

Kalantar, M. e Dashti, R. (2006). Combination of network reconfiguration and capacitor placement for loss reduction in distribution system with based genetic algorithm. In *Universities Power Engineering Conference, 2006. UPEC'06. Proceedings of the 41st International*, volume 1, p. 308–312. IEEE.

Macedo, L. H., Franco, J. F., Mahdavi, M., e Romero, R. (2018). A contribution to the optimization of the reconfiguration problem in radial distribution systems. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 29(6):756–768.

Mendoza, J., López, R., Morales, D., López, E., Dessante, P., e Moraga, R. (2006). Minimal loss reconfiguration using genetic algorithms with restricted population and addressed operators: real application. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(2):948–954.

Montsutsumi, M. M., Melchor, J. N., Macedo, L. H., e Romero, R. (2017). Joint reconfiguration of feeders and allocation of capacitor banks in distribution systems using a multi-start strategy. In *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*, p. 1–6.

Possagnolo, L. H. F. M. (2015). Reconfiguração de sistemas de distribuição operando em vários níveis de demanda através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável. Master's thesis, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira.

Rong, Z., Xiyuan, P., Jinliang, H., e Xinfu, S. (2002). Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution system. In *TENCON'02. Proceedings. 2002 IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering*, volume 3, p. 1945–1949. IEEE.

Shirmohammadi, D. e Hong, H. W. (1989). Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(2):1492–1498.

Shirmohammadi, D., Hong, H. W., Semlyen, A., e Luo, G. (1988). A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 3(2):753–762.

Zhang, D., Fu, Z., Y, D., e Zhang, L. (2006). Capacitor switching and network reconfiguration for loss reduction in distribution system. In *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE*, p. 1–6. IEEE.