DOI: 10.48011/asba.v2i1.1425

Algoritmo em estrutura *Branch and Bound* aplicado ao problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica

Izabeli M. Rosa *izabelimonedar@gmail.com
Gabriel F. Puerta *gfpuerta@gmail.com
Rubén Romero *ruben.feis@gmail.com

* *Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica - LAPSEE. Departamento de Enegenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Avenida Brasil, 56, Centro, 15385-000, Ilha Solteira, SP, Brasil*

Abstract: This paper presents an algorithm in Branch and Bound structure to solve the problem of reconfiguration of radial electricity distribution systems. The objective is to minimize the active power loss in the feeders. The metodology is implemented in MATLAB® environment and tested in two systems known in the literature, 14 and 33 buses. From the results obtained, the good performance of the algorithm is verified to find the best solutions available in the literature.

Resumo: Este trabalho apresenta um algoritmo em estrutura *Branch and Bound* para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica radiais. O objetivo é minimizar as perdas de potência ativa nos alimentadores. A metodologia é implementada em ambiente MATLAB® e testada em dois sistemas conhecidos na literatura, 14 e 33 barras. A partir dos resultados obtidos, verifica-se o bom desempenho do algoritmo para encontrar as melhores soluções disponíveis na literatura.

Keywords: network reconfiguration; Branch and Bound; losses minimization; power systems; distribution networks

Palavras-chaves: reconfiguração de sistemas; *Branch and Bound*; minimização de perdas; sistemas de energia elétrica; redes de distribuição

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência podem ser subdivididos em três grandes áreas: geração, transmissão e a distribuição de energia elétrica. Atualmente, estes três segmentos são objeto de pesquisas e investimentos que visam melhorar seu desempenho, em especial os sistemas de distribuição de energia elétrica (Souza, 2013).

A busca por uma operação do sistema de distribuição com perdas mínimas é uma preocupação frequente das concessionárias, aliada com a necessidade de suprir a demanda garantindo que a energia seja fornecida com qualidade. Neste sentido, a reconfiguração torna-se uma importante ferramenta, visto que segundo Merlin e Back (1975), o grau de liberdade que cabe às concessionárias para reduzir as perdas da rede de energia está na modificação da configuração do sistema.

O sistema de distribuição possui estrutura malhada, de forma que se possa realizar reconfigurações no sistema sem que haja interrupção no fornecimento de energia, contudo, sua operação se dá através de uma estrutura radial. Uma configuração radial pode ser definida como uma estrutura conexa e sem laços independentes. A reconfiguração tem como objetivo encontrar uma topologia através da abertura de chaves normalmente fechadas (NF) e do fechamento de chaves normalmente abertas (NA), mantendo o sistema de distribuição funcionando conforme suas restrições físicas e operacionais e, com o objetivo tipicamente de minimizar as perdas ativas do sistema e melhorar os níveis de tensão.

Na literatura, metodologias diversas foram propostas afim de solucionar o problema de reconfiguração, tais como heurísticas, meta-heurísticas e técnicas exatas de otimização.

Merlin e Back (1975) propuseram, pela primeira vez, duas metodologias com objetivo de encontrar uma topologia para reduzir as perdas nos sistemas de distribuição de energia elétrica. O primeiro é um algoritmo heurístico construtivo (AHC), que consiste em fechar todas as chaves do sistema, tornando-o malhado, e em cada passo se resolve um fluxo de carga de forma que se obtenha o fluxo de potência em cada ramo. O ramo que apresenta menor fluxo é aberto, uma vez que este produz a menor mudança na distribuição de fluxo em relação a topologia malhada. Caso a abertura do ramo deixe o sistema desconexo, o próximo ramo com menor fluxo é verificado. O procedimento se repete até que um sistema radial seja encontrado. Para o segundo método proposto pelos autores, é utilizado um algoritmo de otimização de tipo *branch and bound* (B&B), com o limitante inferior (LI) sendo o valor de perdas mínimas da topologia malhada e o limitante superior (LS) o valor de perdas mínimas da topologia encontrada com a heurística construtiva.

Em Civanlar et al. (1988) os autores propõem uma técnica heurística, denominada de "troca de ramos" (*"branch exchange"*), cuja estratégia baseia-se no fechamento e na abertura de ramos, de forma a se manter a estrutura radial do sistema. A escolha dos ramos é realizada analisando os níveis de tensão das barras terminais da chave que será fechada, detectando a variação de perdas quando a carga é transferida de um circuito para outro por meio do chaveamento. No ano seguinte, Baran e Wu (1989) propuseram uma metodologia de reconfiguração de troca de ramos baseada na proposta de Civanlar et al. (1988), com objetivos de reduzir as perdas e realizar o balanceamento de cargas. A troca de ramos foi aprimorada e são apresentados dois métodos para o cálculo do fluxo de carga. No mesmo ano, Shirmohammadi e Hong (1989) propuseram uma heurística construtiva com o objetivo de minimizar perdas, baseada no trabalho de Merlin e Back (1975). Nesta técnica, inicialmente todos os ramos são fechados e, em cada passo se utiliza um fluxo de carga para redes fracamente malhadas. A chave do ramo que possui o menor fluxo de corrente e que mantém a rede conexa, é aberta. Diferentemente do trabalho de Merlin e Back (1975), os autores incluíram restrições de nível de tensão nas barras e fluxo máximo nos ramos. O fluxo de carga proposto pelos autores é utilizado para cálculo de fluxo em problemas de reconfiguração até os dias de hoje.

Meta-heurísticas são as técnicas de otimização mais utilizadas para resolver o problema de reconfiguração. Mendoza et al. (2006) propuseram um algoritmo genético para resolução do problema que considera uma população inicial factível, introduzindo uma estratégia de laços fundamentais e operadores genéticos especializados. Em Carreno et al. (2008), um algoritmo genético de *Chu-Beasley* é proposto com o objetivo de minimizar as perdas. Os autores implementam um operador de recombinação que gera somente topologias radiais, reduzindo o espaço de busca e assim, o método se mostra com desempenho mais satisfatório que a proposta de Mendoza et al. (2006). Oliveira et al. (2011) apresentam uma metodologia GRASP (*Greedy Randomize Adaptative Search Procedure*) para minimizar as perdas ativas, na qual o AHC generalizado proposto por Merlin e Back (1975) é utilizado na fase construtiva e a heurística proposta por Carreno et al. (2008) foi utilizada na fase de busca local. Feiteira et al. (2018) também aplicaram a estratégia GRASP, sendo utilizado o AHC generalizado proposto por Merlin e Back (1975) e um algoritmo de busca em vizinhança na fase de busca local. Em Possagnolo e Romero (2014), os autores propuseram um algoritmo baseado na meta-heurística de Busca em Vizinhança Variável (VNS), o algoritmo VNS de descida (VND) para minimizar as perdas de potência ativa no sistema. São utilizadas estratégias de geração de soluções radiais e de redução da vizinhança que, segundo os autores, diminuem o espaço de busca do algoritmo tornando-o mais rápido e eficaz.

Em Lavorato et al. (2012) os autores apresentam uma revisão da literatura e uma proposta para incorporar de maneira simples, as restrições de radialidade do sistema no modelo matemático. O trabalho contorna um problema que tornou difícil, por muito tempo, a modelagem matemática para o problema de reconfiguração. Foram realizados testes em 7 sistemas, resolvidos utilizando um algoritmo B&B.

Conforme os trabalhos realizados ao longo dos anos para solução do problema de reconfiguração, observa-se algumas características necessárias, como: (i) a necessidade de que as soluções iniciais sejam obrigatoriamente topologias radiais; (ii) estratégias eficientes de controle da radialidade de topologias novas que serão geradas a partir de uma topologia radial já disponível; (iii) o problema apresenta uma natureza altamente combinatória implicando em um número alto de topologias radiais que podem ser obtidas (Feiteira et al., 2018).

Neste trabalho, desenvolve-se um algoritmo em estrutura B&B, cuja árvore de soluções é controlada utilizando a proposta de Glover e Zionts (1965). Utiliza-se de critérios para escolha do próximo subproblema a ser resolvido, bem como a variável correspondente ao ramo que é selecionada para separação. Testes de sondagens de subproblemas também são realizados.

2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica (RSDEE) possui como objetivo principal encontrar uma topologia radial que satisfaça o critério de otimização. A busca acontece através de manobras de chaves NA e chaves NF presentes na rede de distribuição. Geralmente, o principal critério de otimização utilizado é a minimização das perdas ativas da rede. O modelo matemático de programação não linear inteiro-misto (PNLIM) para o problema de RSDEE é apresentado em (1)–(11), adaptado de Lavorato et al. (2012).

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_l} g_{ij} x_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos\theta_{ij}) \tag{1}$$

s.a.:

$$P_i^S - P_i^D - \sum_{j \in \Omega_{b_i}} x_{ij} P_{ij} = 0 \qquad \forall i \in \Omega_b \tag{2}$$

$$Q_i^S - Q_i^D - \sum_{j \in \Omega_{b_i}} x_{ij} Q_{ij} = 0 \qquad \forall i \in \Omega_b \tag{3}$$

$$\underline{V} \le V_i \le \overline{V} \qquad \forall i \in \Omega_b \tag{4}$$

$$I_{r_{ij}}^2 + I_{m_{ij}}^2 \le x_{ij} \overline{I}_{ij}^2 \qquad \forall ij \in \Omega_l \tag{5}$$

$$\sum_{ij \in \Omega_l} x_{ij} = nb - 1 \tag{6}$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \qquad \forall ij \in \Omega_l \tag{7}$$

$$P_{ij} = V_i^2 g_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \cos\theta_{ij} + b_{ij} \mathrm{sen}\theta_{ij}) \qquad \forall ij \in \Omega_l \tag{8}$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 b_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \mathrm{sen}\theta_{ij} - b_{ij} \cos\theta_{ij}) \quad \forall ij \in \Omega_l \tag{9}$$

$$I_{r_{ij}} = g_{ij}(V_i \cos\theta_i - V_j \cos\theta_j) - b_{ij}(V_i \mathrm{sen}\theta_i - V_j \mathrm{sen}\theta_j) \qquad \forall ij \in \Omega_l \tag{10}$$

$$I_{m_{ij}} = g_{ij}(V_i \mathrm{sen}\theta_i - V_j \mathrm{sen}\theta_j) - b_{ij}(V_i \cos\theta_i - V_j \cos\theta_j) \qquad \forall ij \in \Omega_l \tag{11}$$

No modelo, os conjuntos são os seguintes: Ω_b representa o conjunto de barras do sistema, Ω_{b_i} representa o conjunto de barras conectadas a barra i e Ω_l representa o conjunto de ramos presentes no sistema.

Os parâmetros presentes no modelo são: g_{ij} e b_{ij} representam respectivamente a condutância e susceptância do ramo ij; P_i^D e Q_i^D representam a demanda ativa e reativa na barra i, respectivamente; $\underline{V}$ e $\overline{V}$ são, respectivamente, os limites mínimo e máximo de magnitude de tensão permitidos para o fornecimento; $\overline{I}_{ij}^2$ é a magnitude máxima de fluxo de corrente ao quadrado permitida no ramo ij; e finalmente, nb representa o número de barras presentes no sistema.

As variáveis do modelo matemático são as seguintes: x_{ij} é uma variável binária que representa o estado operativo do ramo ij, sendo que $x_{ij} = 1$ indica que o ramo está fechado e $x_{ij} = 0$ indica que o ramo está aberto; V_i é o módulo da tensão na barra i; θ_{ij} representa a diferença angular entra as tensões das barras i e j; P_i^S e Q_i^S são, respectivamente, a potência ativa e reativa fornecidas pela subestação na barra i; P_{ij} e Q_{ij} representam, respectivamente, os fluxos de potência ativa e reativa no ramo ij; finalmente, $I_{r_{ij}}$ e $I_{m_{ij}}$ são as partes real e imaginária da corrente no ramo ij.

A função objetivo é representada pela relação (1) e possui como critério de otimização a minimização das perdas ativas no sistema. O cumprimento da primeira lei de Kirchhoff é imposto pelas relações (2) e (3). Através dessas relações também é feito o balanço de potência ativa e reativa em cada barra do sistema elétrico. A relação (4) impõe o cumprimento do limite mínimo e máximo adequados de tensão em cada barra do sistema elétrico. A relação (5) limita o fluxo de corrente máximo permitido em cada ramo do sistema. A natureza binária da variável de decisão x_{ij} é imposta pela relação (7). De acordo com Lavorato et al. (2012), a relação (6) em conjunto com as relações (2) e (3) garantem que toda solução factível do problema também seja radial. Nas relações (8)-(11) é calculado o fluxo de potência ativa, o fluxo de potência reativa, o valor da parte real da corrente e o valor da parte imaginária da corrente, respectivamente.

3. METODOLOGIA

O algoritmo desenvolvido utiliza uma estrutura B&B, cuja árvore de soluções é controlada através da proposta de enumeração de Glover e Zionts (1965). A adaptação da metodologia para o problema de reconfiguração é dada através da geração de uma árvore binária, cujas ramificações indicam em qual estado de operação as chaves do sistema se encontram: abertas ou fechadas.

Inicialmente, de forma a melhorar o desempenho do método, é desejável determinar uma boa solução inicial. Propõe-se então obtê-la utilizando um AHC baseado na proposta de Merlin e Back (1975). Os passos para a solução inicial são:

Início: Fechar todas as chaves do sistema (rede malhada) e $J_t = \emptyset$

Repetir os passos $(1) - (5)$ até que um sistema radial seja obtido:

(1) Identificar os laços independentes do sistema;
(2) Identificar os ramos pertencentes aos conjuntos de laços;
(3) Resolver um problema de Fluxo de Carga Fracamente Malhado (FCFM);
(4) Para os ramos identificados em (2), encontrar o que possui o valor mínimo de fluxo de potência aparente e que mantenha o sistema conectado;
(5) Abrir a chave do ramo identificado em (4) e armazenar sua numeração em J_t com o sinal negativo, indicando que a chave correspondente ao ramo foi aberta.

Por fim, calcular a função objetivo da solução encontrada resolvendo um Fluxo de Carga (FC) para sistemas radiais.

Esta solução é a incumbente inicial e representa uma LS. A partir dela se inicia a estratégia *backward* do método proposto. É utilizado o critério LIFO (*Last In, First Out*), selecionando o último subproblema gerado para ser analisado, representado na solução corrente J_t como o elemento mais à direita não sublinhado. Complementando este ramo em J_t, é verificado se foi complementado em seu estado aberto ou fechado. Caso complementado em estado aberto, é verificado se atende a algum critério de sondagem (veja a Seção 3.2), caso atenda, o movimento *backward* continua. Por outro lado, se o elemento for complementado em estado fechado, parte-se para a estratégia *forward* da metodologia.

A estratégia *forward* inicia ordenando os ramos livres em uma Lista do Maior para o Menor Fluxo (LMMF) de potência aparente de J_t, sendo este o critério de prioridade para escolha do ramo. A ideia é escolher o ramo que produz o maior incremento na função objetivo para permitir a rápida eliminação dos subproblemas gerados. O primeiro ramo da LMMF é selecionado para realizar a geração do subproblema J_{t+1} com a variável fixada em 1 e a variável referente ao ramo é retirada da LMMF. Através da regra LIFO, o processo *forward* continua do subproblema J_{t+1} desde que ele não seja sondado através dos testes. Conforme o movimento *forward* acontece, não é necessário calcular os LI dos subproblemas, dado que o movimento de descida apenas incrementa ramos fechados à solução, logo o valor de seu LI não é alterado. Quando no movimento *forward* um subproblema for sondado, migra-se para o movimento *backward*.

O processo termina quando todos os subproblemas forem sondados.

As restrições físicas e operacionais dos sistemas de distribuição são impostas e controladas através dos cálculos de FC e FCFM que também fornecem o valor da função objetivo da solução. Quanto às restrições topológicas, são impostas e controladas através do algoritmo baseado em B&B.

3.1 Definições utilizadas

A representação da proposta de solução é baseada no esquema de enumeração implícita de Glover e Zionts (1965). Para cada subproblema gerado, é atribuído um valor para a variável binária que o representa, caracterizando a abertura ou fechamento do ramo. Este processo é representado através da solução J_t.

Notação: $+j$ indica que $x_j = 1$ e $-j$ indica que $x_j = 0$. Um elemento sublinhado, como $\underline{j}$, indica que a variável x_j para a alternativa $x_j = 0$ já foi analisada e sondada. De forma análoga com $-\underline{j}$ indica que a alternativa $x_j = 1$ já foi analisada e sondada. A variável binária x_j representa o status do ramo j, $x_j = 0$ para o estado aberto e $x_j = 1$ caso contrário.

Solução corrente: J_t é a solução corrente, na qual estão definidos os valores binários das variáveis que representam os ramos. Por exemplo:

$$J_t = \{1, -2, -\underline{7}, 9\} \tag{12}$$

Indicando que $x_1 = x_9 = 1$, $x_2 = 0$ e $x_7 = 0$ com a alternativa $x_7 = 1$ já sondada.

Perdas da solução corrente: Para cada solução corrente é determinada a sua função objetivo através do FCFM ou FC, a qual fornece o valor de perdas da configuração corrente. Neste trabalho, as perdas de cada subproblema é também seu LI.

Variáveis livres: As variáveis livres são aquelas que não tem valor binário atribuído por uma solução parcial e portanto se encontram disponíveis para assumir um valor 0-1. Entretanto, na metodologia apresentada, uma variável livre é considerada em estado fechado, ou seja, o ramo se encontra temporariamente fechado para que seja possível realizar o processamento de cálculos.

3.2 Testes de sondagem

Um subproblema pode ser eliminado do processo de busca caso atenda algum dos seguintes testes:

Teste 1: Se a solução corrente for desconexa.
Teste 2: Se o LI da solução corrente for maior ou igual à perda total mínima da melhor solução radial (a incumbente).
Teste 3: Se ao fixar um ramo em estado fechado ao sistema, houver a formação de laço na configuração.
Teste 4: Se o número de ramos fixados em estado aberto no sistema for igual ao número de laços independentes da configuração malhada.
Teste 5: Se o número de ramos fixados em estado fechado for igual ao número de barras menos um.

Quando um subproblema é eliminado do processo de busca, ou seja, quando é sondado, todos os seus descendentes também são, dado que geralmente eles terão um valor de perda total igual ou superior a incumbente.

3.3 Algoritmo

Passo 1: Montar os dados do problema. Obter a solução inicial através do AHC e montar J_t. Armazenar a configuração como LS e incumbente. Ir ao Passo 2.

Passo 2: Estratégia *backward*

a) Se $J_t = \emptyset$ parar o processo e a incumbente é a solução ótima. Em caso contrário ir ao Passo 2(b).

b) Analisar o elemento mais à direita de J_t. Caso o elemento esteja sublinhado, eliminá-lo de J_t, adicioná-lo à lista LMMF e voltar ao Passo 2(a). Em caso contrário, fazer J_{t+1} complementando o elemento e há duas situações que podem acontecer:

i. O ramo foi complementado com seu estado fechado. Significa que este ramo pertence a solução AHC e neste caso, o subproblema com o ramo em estado aberto já foi analisado, então é realizado seu complemento em estado fechado e o ramo é sublinhado. Fazer $J_{t+1} = J_t$. Para J_t é resolvido um problema de fluxo de carga fracamente malhado e a LMMF é atualizada. Ir para Passo 3.
ii. O ramo foi complementado com seu estado aberto. O subproblema com o ramo em estado fechado já foi analisado, é realizado seu complemento em estado aberto e o ramo é sublinhado. Fazer $J_{t+1} = J_t$. Atualizar a LMMF. Ir ao Passo 2(c).

c) Para a solução corrente J_t, podem acontecer as seguintes situações:

i. Ao fixar o ramo em estado aberto, a configuração atende ao Teste 1. Neste caso a topologia é desconexa, portanto infactível e é sondada. Voltar ao Passo 2.
ii. Ao fixar o ramo em estado aberto, a configuração não atende ao Teste 1 e atende ao Teste 4. Portanto, as variáveis livres da LMMF são definitivamente fixadas em estado fechado e é resolvido um problema de fluxo de carga para sistemas radiais. Neste ponto é analisado se a solução é melhor que a incumbente, caso seja, a incumbente é atualizada e J_t é sondado. Caso contrário, J_t é simplesmente sondado. Para ambos os casos, a próxima ação é voltar ao Passo 2.
iii. Ao fixar o ramo em estado aberto, a configuração não atende ao Teste 1 e não atende ao Teste 4. Neste caso é resolvido um problema de fluxo de carga para sistemas fracamente malhados para a solução corrente J_t e a LMMF é atualizada. Ir ao Passo 3.

Passo 3: Estratégia *forward*

a) Verifica-se se a solução corrente J_t atende ao Teste 2. Se sim, sondar e voltar ao Passo 2. Em caso contrário ir ao Passo 3(b).

b) Escolhe-se a variável x_j que corresponde ao ramo melhor classificado em LMMF para ramificar J_t em J_{t+1} com $x_j = 1$. Fazer $J_{t+1} = J_t$. O ramo x_j é retirado da lista LMMF e passa a compor o vetor de solução corrente. Podem acontecer as seguintes situações:

i. Ao fixar o ramo em estado fechado, a configuração atende ao Teste 3. Neste caso o ramo ao ser fixado forma um laço no sistema e J_t é sondado. Voltar ao Passo 2.
ii. Ao fixar o ramo em estado fechado, a configuração não atende ao Teste 3 e atende ao Teste 5. Portanto, as variáveis livres da LMMF são definitivamente fixadas em estado aberto e é resolvido problema de fluxo de carga para sistemas radiais. Neste ponto é analisado se a solução é melhor que a incumbente, caso seja, a incumbente é atualizada e J_t é sondado. Caso contrário, J_t é simplesmente sondado. Para ambos os casos, a próxima ação é voltar ao Passo 2.
iii. Ao fixar o ramo em estado fechado, a configuração não atende ao Teste 3 e não atende ao Teste 5. Não é necessário resolver um novo problema de fluxo de carga, pois ao fixar um ramo em estado fechado, o valor de perdas não se altera. Neste caso o processo *forward* deve continuar. Voltar ao Passo 3(b).

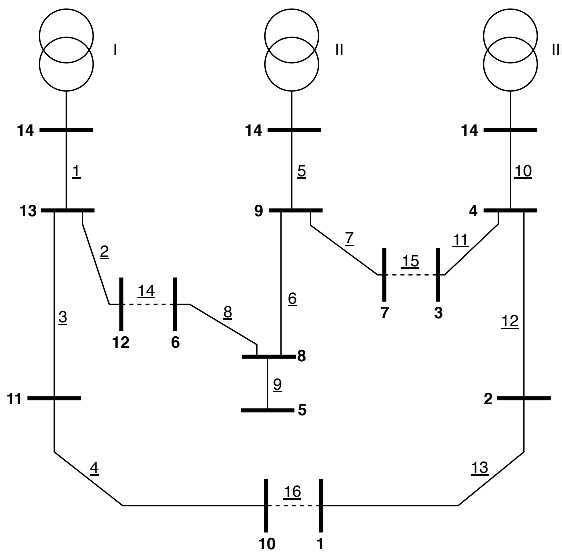

Figura 1. Topologia inicial do sistema de 14 barras

4. TESTES E RESULTADOS

O algoritmo baseado em B&B proposto foi implementado em linguagem de programação MATLAB® versão R2017a e os testes foram realizados em um computador DELL com processador Intel® Core ™i7-8700 de 3.20 GHz e 16.0 GB de memória RAM. A robustez do algoritmo foi avaliada a partir de testes realizados em dois sistemas de distribuição radiais, o sistema de 14 barras (Civanlar et al., 1988) e o de 33 barras (Baran e Wu, 1989). Para ambos os sistemas é considerado $\underline{V} = 0,93$ p.u e $\overline{V} = 1,05$ p.u.

4.1 Sistema de 14 barras

O primeiro sistema utilizado possui 14 barras, sendo 13 barras de carga e uma de subestação e 16 ramos. Os dados do sistema estão presentes em Civanlar et al. (1988), sendo que a tensão na subestação é de 23 kV, as demandas totais de potência ativa e reativa são, respectivamente de 28.700 kW e 5.900 kVAr. A topologia inicial do sistema é apresentada na Figura 1, as chaves 14, 15 e 16 encontram-se abertas e o sistema possui perdas de 511,43 kW e tensão mínima de 0,9693 p.u.

O algoritmo proposto encontrou a configuração com a melhor solução conhecida para o sistema, resolvendo um total de 31 FCFM e 8 FC. A solução obtida com as chaves 7, 8 e 16 abertas, apresenta perdas de 466,12 kW, que representa uma redução de 8,86% em relação a configuração inicial, com tensão mínima de 0,9716 p.u. Na Tabela 1 é feita a comparação do resultado obtido para o sistema de 14 barras. Os trabalhos utilizados para comparação de resultados do sistema é o de Possagnolo e Romero (2014) e Souza (2013). Possagnolo e Romero (2014) utilizam um algoritmo de busca em vizinhança VND e a proposta de Souza (2013) utiliza uma meta-heurística GRASP especializada.

Mostra-se na Figura 2, os perfis de tensão mínima no sistema de 14 barras para a topologia inicial e a topologia final. Constata-se a melhoria no perfil de tensão mínima do sistema.

Tabela 1. Resultados para o sistema de 14 barras.

Método	Circuitos abertos	Perdas (kW)
Algoritmo proposto	7, 8 e 16	466,12
VND	7, 8 e 16	466,12
GRASP	7, 8 e 16	466,12

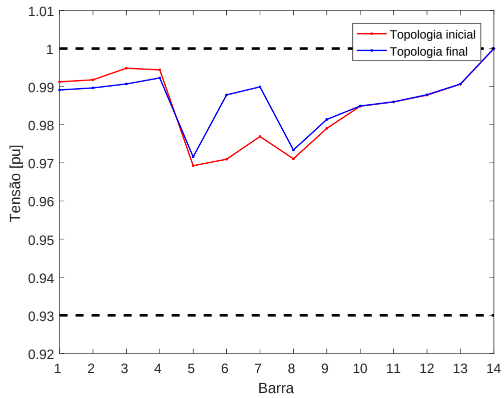

Figura 2. Perfil de tensão do sistema de 14 barras

4.2 Sistema de 33 barras

O segundo sistema utilizado possui 33 barras, sendo 32 barras de carga e uma barra de subestação e 37 ramos. Os dados do sistema estão presentes em Baran e Wu (1989), sendo que a tensão na subestação é de 12,66 kV, as demandas totais de potência ativa e reativa são, respectivamente de 3.715 kW e 2.300 kVAr. A topologia inicial do sistema é apresentada na Figura 3, as chaves 33, 34, 35, 36 e 37 encontram-se abertas e o sistema possui perdas de 202,67 kW e tensão mínima de 0,9131 p.u.

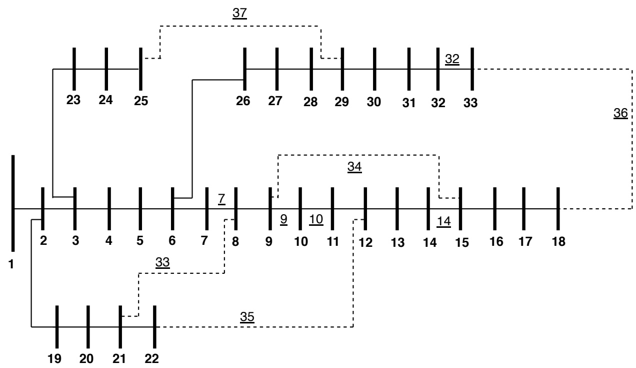

Figura 3. Topologia inicial do sistema de 33 barras

O algoritmo proposto encontrou a configuração com a melhor solução conhecida para o sistema, resolvendo um total de 759 FCFM e 26 FC. A solução obtida com as chaves 7, 9, 14, 32 e 37 abertas, apresenta perdas de 139,55 kW, que representa uma redução de 31,15% em relação a configuração inicial, com tensão mínima de 0.9378 p.u. Na Tabela 2 é feita a comparação do resultado obtido para o sistema de 33 barras. Os trabalhos utilizados para comparação de resultados do sistema é o de Possagnolo (2015) e Souza (2013). Possagnolo (2015) utiliza um algoritmo de busca em vizinhança VND e a proposta de Souza (2013) utiliza uma meta-heurística GRASP especializada.

Tabela 2. Resultados para o sistema de 33 barras.

Método	Circuitos abertos	Perdas (kW)
Algoritmo proposto	7, 9, 14, 32 e 37	139,55
VND	7, 9, 14, 32 e 37	139,55
GRASP	7, 9, 14, 32 e 37	139,55

Mostra-se na Figura 4, os perfis de tensão mínima no sistema de 33 barras para a topologia inicial e a topologia final. Constata-se a melhoria no perfil de tensão mínima do sistema.

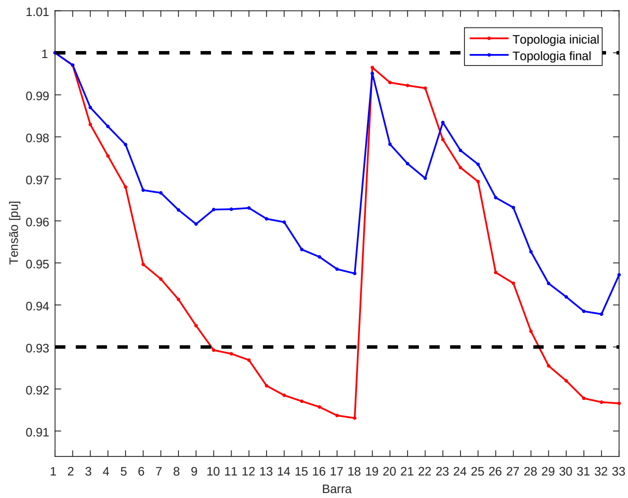

Figura 4. Perfil de tensão do sistema de 33 barras

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta um algoritmo baseado em uma estrutura B&B para resolver o problema de RSDEE com o objetivo de minimizar as perdas do sistema e melhorar os perfis de tensão. Os testes de sondagem da metodologia fazem com que seja desnecessário a análise de subproblemas possivelmente não desejáveis.

A metodologia apresenta uma menor complexidade de implementação quando comparada a outros métodos para resolução do problema de RSDEE. Apresenta também bom desempenho para sistemas de pequeno porte, encontrando soluções iguais às melhores soluções presentes na literatura para os sistemas de 14 e 33 barras.

A proposta deste trabalho pode ser estendida para considerar a resolução de sistemas de distribuição de médio e grande porte. Para isto, sugestões para trabalhos futuros incluem:

- Aperfeiçoamento da metodologia inserindo e/ou modificando testes de sondagem;
- Modificação da estratégia de encontrar uma boa solução inicial.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) processo nº 2015/21972-6.

REFERÊNCIAS

Baran, M.E. e Wu, F.F. (1989). Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Power Engineering Review*, 9(4), 101–102.

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.

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

Feiteira, I.F., Macedo, L.H., e Romero, R. (2018). Meta-heurística grasp especializada para a reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica. In *XXII Congresso Brasileiro de Automática*. João Pessoa, Brasil.

Glover, F. e Zionts, S. (1965). A note on the additive algorithm of balas. *Operations Research*, 13(4), 546–549.

Lavorato, M., Franco, J.F., Rider, M.J., e Romero, R. (2012). Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(1), 172–180.

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.

Merlin, A. e Back, H. (1975). Search for minimum-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system. In *Proc. of the 5th PSCC*. Power System Computation Conference, Cambridge, Inglaterra.

Oliveira, M., Lavorato, M., e Romero, R. (2011). Reconfiguração de sistemas de distribuição utilizando a metaheurística grasp. In *XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*.

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*. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica), Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira, São Paulo.

Possagnolo, L.H.F.M. e Romero, R. (2014). Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável. In *XLVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 1146–1157. Salvador, Brasil.

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.

Souza, S.S.F.d. (2013). *Algoritmo GRASP especializado aplicado ao problema de reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição radial*. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica), Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira, São Paulo.