

META-HEURÍSTICA GRASP ESPECIALIZADA PARA A RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

ISABELLA F. FEITEIRA, 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: isabellaffeiteira@gmail.com, leohfmp@ieee.org,
ruben@dee.feis.unesp.br*

Abstract— This paper presents a specialized Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) algorithm to solve the problem of reconfiguration of radial electric power distribution systems. The objective is to find the radial operating topology that minimizes the active losses in the system and that complies with the natural laws of circuits (both Kirchhoff's laws) and the operating limits of the system's equipment (voltage limits on the nodes and current limits on the branches). The reconfiguration allows for more efficient operation of the system and better quality of the service. The performance of the proposal is tested using two test systems, with 84 and 136 nodes, widely used in specialized literature.

Keywords— GRASP, losses minimization, metaheuristic, optimization, reconfiguration of distribution networks.

Resumo— Este artigo apresenta um algoritmo *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP) especializado para resolver o problema da reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica radiais. O objetivo é encontrar a topologia de operação radial que minimiza as perdas ativas no sistema e que cumpra com as leis naturais de circuitos (as duas leis de Kirchhoff) e os limites de operação dos equipamentos do sistema (limites de tensão nas barras e de corrente nos ramos). A reconfiguração permite uma operação mais eficiente do sistema, e com melhor qualidade do serviço. A performance da proposta é testada em dois sistemas testes, de 84 e 136 barras, amplamente utilizados na literatura especializada.

Palavras-chave— GRASP, meta-heurística, minimização de perdas, otimização, reconfiguração de sistemas de distribuição.

1 Introdução

O problema da reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica (RSDEE) tem como objetivo encontrar a topologia radial ótima que minimiza uma função objetivo, geralmente as perdas ativas. O estado normal de operação de um sistema de distribuição é em configuração radial. Assim, em uma determinada configuração, o sistema tem um conjunto de circuitos que estão energizados (normalmente fechados) e estes formam a configuração radial, chamada de árvore do ponto de vista de grafos. Por outro lado, os circuitos que não estão energizados são chamados de ramos de ligação (normalmente abertos). Uma troca adequada de um ramo de ligação com um ramo da árvore leva a outra configuração radial.

A restrição de rede radial tornou difícil usar modelos matemáticos no problema de RSDEE por muito tempo. Entretanto, trabalhos recentes como (Lavorato et al., 2012) contornam este problema. Meta-heurísticas, no entanto, ainda são as técnicas de otimização mais usadas, sobretudo para sistemas de grande porte e complexos.

Contribuições importantes sobre o tema de RSDEE podem ser encontradas em (Baran and Wu 1989; Shirmohammadi and Hong, 1989) que propõem heurísticas para a resolução do problema e (Mendoza, et al., 2006; Carreño, Romero and Padilha-Feltrin 2008) que propõem algoritmos genéticos.

Neste trabalho, apresenta-se um algoritmo *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP) (Feo and Resende, 1995; Glover and Kochenberger, 2003) especializado em encontrar a topologia radial de perdas mínimas para a RSDEE.

O problema de RSDEE apresenta algumas particularidades como: (i) a necessidade de uma estratégia eficiente de geração de topologias radiais que sejam usadas como propostas iniciais de solução; (ii) a definição de uma estratégia eficiente de geração de novas topologias radiais a partir de topologias radiais já disponíveis; e (iii) o caráter altamente combinatório do problema, isto é, alto número de topologias radiais possíveis de serem obtidas.

Toda meta-heurística necessita de uma forma de representação da proposta de solução e esta deve permitir o cálculo do valor da função objetivo, a verificação da factibilidade e permitir a definição de vizinhança da solução corrente e a implementação de operadores típicos de cada meta-heurística.

De maneira ideal, o problema de RSDEE apresenta dois tipos de restrições: (i) restrições topológicas, que exigem que uma proposta factível deve ser radial; e (ii) restrições operacionais, que exigem que as propostas de solução devem satisfazer as duas leis de Kirchhoff e os limites de operação do sistema, como os limites de corrente nos ramos e magnitude de tensão nas barras.

Após escolher uma topologia radial, deve-se calcular um fluxo de carga radial (Shirmohammadi et al., 1988) para determinar se a proposta de solução é factível ou infactível. Se a proposta de solução for factível, então a qualidade dela está representada pelo valor das perdas.

Neste trabalho, desenvolve-se um algoritmo GRASP especializado que gera soluções radiais de forma eficiente e depois usa uma fase de melhoria local na qual realiza as transições apenas através de topologias radiais.

2 Modelo Matemático

O modelo matemático para o problema de RSDEE para minimização de perdas ativas é apresentado em (1)–(11).

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

sujeito a:

$$P_i^{SE} - P_i^D - \sum_{j \in N_i} x_{ij} P_{ij} = 0 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$Q_i^{SE} - Q_i^D - \sum_{j \in N_i} x_{ij} Q_{ij} = 0 \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$\underline{V} \leq V_i \leq \bar{V} \quad \forall i \in N \quad (4)$$

$$I_{r_{ij}}^2 + I_{m_{ij}}^2 \leq x_{ij} \bar{I}_{ij}^2 \quad \forall ij \in B \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall ij \in B \quad (6)$$

$$\sum_{ij \in B} x_{ij} = |N| - 1 \quad (7)$$

$$P_{ij} = V_i^2 g_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (8)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 b_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (9)$$

$$I_{r_{ij}} = g_{ij} (V_i \cos \theta_i - V_j \cos \theta_j) - b_{ij} (V_i \sin \theta_i - V_j \sin \theta_j) \quad (10)$$

$$I_{m_{ij}} = g_{ij} (V_i \sin \theta_i - V_j \sin \theta_j) + b_{ij} (V_i \cos \theta_i - V_j \cos \theta_j) \quad (11)$$

$$\forall ij \in B$$

Neste modelo, B é o conjunto de ramos do sistema, N é o conjunto de barras e N_i é o conjunto de barras conectadas à barra i . Os parâmetros g_{ij} e b_{ij} são a condutância e a susceptância do ramo ij , respectivamente, P_i^D e Q_i^D representam a demanda ativa e reativa na barra i , respectivamente, $\underline{V}$ e $\bar{V}$ são os limites mínimo e máximo para a tensão nas barras do sistema e $\bar{I}_{ij}$ é o limite de corrente do ramo ij .

As variáveis são: x_{ij} indica o estado de operação do ramo ij ($x_{ij} = 0$ se o ramo não está operando e $x_{ij} = 1$ em caso contrário), V_i é o módulo da tensão na barra i , $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ é a diferença angular das tensões nas barras i e j , P_i^{SE} e Q_i^{SE} representam a potência ativa e reativa fornecidas pela subestação na barra i , P_{ij} e Q_{ij} são os fluxos de potência ativa e reativa no ramo ij , respectivamente, e $I_{r_{ij}}$ e $I_{m_{ij}}$ são as partes real e imaginária da corrente no ramo ij .

A função objetivo v minimiza as perdas ativas no sistema. As restrições (2) e (3) são os balanços de potência ativa e reativa no sistema e representam a aplicação da primeira lei de Kirchhoff. As restrições (4) e (5) representam os limites de magnitude de tensão nas barras e de corrente nos ramos do sistema. A restrição (6) indica a natureza binária da variável de decisão x_{ij} . A restrição (7) é uma condição necessária para radialidade, que em conjunto com (2) e (3) garante a topologia radial do sistema elétrico. As restrições (8) e (9) calculam os valores de fluxos de potência ativa e

reativa no sistema, e em conjunto com (2) e (3) impõem a segunda lei de Kirchhoff. Por fim (10) e (11) fornecem os valores das partes real e imaginária da corrente, usadas em (5).

O modelo apresentado é de programação não linear inteira mista, de difícil solução e com característica de apresentar explosão combinatória.

3 Meta-Heurística GRASP

O nome GRASP é advindo do inglês *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*, ou seja, um algoritmo heurístico construtivo do tipo guloso, porém que utiliza uma componente aleatória e adaptativa. Este algoritmo é uma junção e uma generalização do algoritmo heurístico construtivo do tipo guloso e do algoritmo heurístico de busca através de vizinhança.

O indicador de sensibilidade identifica a componente que deve ser escolhida na solução em construção e geralmente tem uma característica gulosa nos algoritmos heurísticos construtivos. A generalização na fase construtiva do GRASP no problema de RSDEE permite escolher uma componente de uma lista RCL (*Restricted Candidate List*) de candidatos promissores. A lista RCL é variável e dependente da evolução do processo. Após a fase construtiva, cada nova topologia encontrada pode ser submetida a um processo de busca local a fim de encontrar-se uma solução de melhor qualidade.

O algoritmo GRASP apresenta o seguinte processo para um problema genérico:

1. Implementar a fase de pré-processamento;
2. Realizar a fase construtiva;
3. Realizar a fase de busca local a partir da solução da fase construtiva, atualizando a incumbente, caso seja possível;
4. Se o critério de parada não for satisfeito, voltar ao passo 2. Caso contrário, parar. A resposta do algoritmo será a incumbente armazenada.

Esses passos do GRASP são detalhados na próxima seção no contexto do problema de RSDEE.

4 Meta-Heurística GRASP Aplicada ao Problema de RSDEE

Apresenta-se nesta seção, o algoritmo GRASP adaptado para resolver o problema de RSDEE. Inicialmente, demonstra-se a forma de representação de uma proposta de solução. Em seguida é apresentada a fase de pré-processamento e como é adquirida a informação adicional de fluxos de potência aparente nos ramos do sistema. Finalmente, é apresentada a fase construtiva e a fase de melhoria local do GRASP aplicado ao problema de RSDEE.

4.1 Representação de uma Proposta de Solução

Uma forma eficiente de representação de uma proposta de solução deve permitir encontrar o valor da

função objetivo, verificar se essa proposta é factível ou infactível e permitir gerar novas propostas de solução de acordo com a lógica do GRASP. Nesta meta-heurística, existem duas fases: a construtiva e a de busca local. Na segunda fase usa-se a lógica de busca através de vizinhança, portanto, uma forma eficiente de representar uma proposta deve permitir a definição de soluções vizinhas de uma forma adequada.

No problema de RSDEE apenas uma parcela das variáveis de decisão é representada em uma proposta de solução. Ou seja, apenas a informação do estado operativo dos ramos (em operação ou não) são representadas na proposta de solução. Os valores das outras grandezas tais como o módulo de tensão nas barras do sistema e as correntes nos ramos são encontrados calculando-se um fluxo de carga radial (Shirmohammadi et al., 1988). A solução deste fluxo de carga também permite encontrar as perdas ativas do sistema, isto é, o valor da função objetivo, assim como verificar possíveis infactibilidades operacionais (violação de limites de correntes nos ramos e/ou de módulo de tensão nas barras do sistema). Neste trabalho, todas as soluções infactíveis são descartadas no processo de busca.

Para o caso particular do problema de RSDEE, uma proposta de solução deve ter topologia radial. Para mostrar a forma de representar uma proposta de solução utiliza-se a topologia do sistema de 14 barras (Civanlar et al., 1988) mostrada na Figura 1.

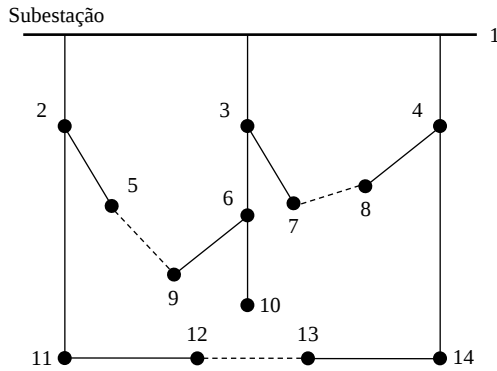


Figura 1. Sistema de 14 barras

A Figura 1 mostra uma proposta de solução radial com $|N| - 1$ ramos fechados e $|B| - |N| + 1$ ramos abertos, em que $|N| = 14$ é o número de barras e $|B| = 16$ é o número de ramos, representada em um vetor como mostrado na Figura 2.

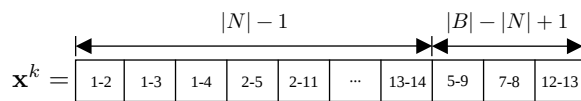


Figura 2. Representação de uma proposta de solução

Nessa proposta está implícito que os primeiros $|N| - 1$ elementos estão operando em estrutura radial, a ordem destes não é relevante, e os outros ramos estão desconectados. Portanto, a meta-heurística deve utilizar mecanismos adequados para sempre gerar topologias radiais e representá-las na forma adequada.

4.2 Fase de Pré-Processamento

O pré-processamento no algoritmo GRASP, tem a finalidade de diminuir o espaço de busca, identificando características específicas do problema.

Qualquer conhecimento que seja possível incorporar no processo de geração de topologias radiais deve ser implementado na estrutura GRASP, na fase de pré-processamento. Neste trabalho foram identificados dois processos, sendo eles a identificação de ramos que não formam laços na estrutura malhada do sistema de distribuição e o cálculo dos fluxos de potência aparente em cada ramo do sistema malhado.

A Figura 1 permite mostrar a estratégia de identificar ramos que não fazem parte de laços gerados pela topologia completa do sistema de distribuição. Por exemplo, o ramo 6-10 não forma laço. No pré-processamento, todos os ramos desse tipo são identificados. Na fase construtiva, a geração de uma topologia radial é iniciada com a incorporação destes ramos, permitindo gerar uma topologia radial mais rapidamente. Ademais, na fase de melhoria local esses ramos não participam da geração de topologias vizinhas da solução corrente.

Adicionalmente, na fase de pré-processamento deve-se utilizar uma informação importante relacionada ao conhecimento específico do problema. Em (Merlin and Back, 1975) aparece a verificação do fato de que se fosse permitido que o sistema de distribuição operasse com todos os ramos fechados, os fluxos de potência se distribuiriam no sistema seguindo a lei do mínimo esforço. Em outras palavras, a operação malhada apresenta perdas reduzidas (Ritter, Franco and Romero, 2015). Assim, existe uma diferença significativa entre as perdas no sistema totalmente malhado e na topologia radial ótima, como também verificado em (Ritter, Franco and Romero, 2015).

Aceitando a lógica de Merlin e Back, uma excelente topologia radial pode ser encontrada retirando-se ramos da topologia malhada através de um processo iterativo. Em cada passo é retirado o ramo que transporta o menor valor de fluxo de potência aparente, desde que a retirada desse ramo preserve a conectividade do sistema de distribuição.

Essa estratégia heurística sugere retirar o ramo com menor valor de potência aparente com a finalidade de produzir a menor redistribuição de fluxos em relação à topologia malhada. A proposta neste trabalho consiste em usar uma generalização da estratégia heurística de Merlin e Back na fase construtiva do algoritmo GRASP. Para essa finalidade calcula-se um fluxo de carga para sistemas de distribuição malhados (Shirmohammadi et al., 1988), uma única vez, e armazena-se essa informação para ser usada na fase construtiva do GRASP.

4.3 Implementação da Fase Construtiva

A fase construtiva do algoritmo GRASP para o problema de RSDEE é desenvolvida usando uma generalização da proposta de (Merlin and Back, 1975) e

deve satisfazer um requisito fundamental: gerar topologias radiais diferentes e de boa qualidade. Na construção de uma topologia radial de boa qualidade, a lógica fundamental é adicionar ao grafo em construção o ramo com o maior valor de fluxo de potência aparente do sistema malhado, calculado na fase de pré-processamento. Entretanto, se isto for feito em todas as etapas, será gerada apenas uma topologia radial que seria muito parecida com a encontrada usando a estratégia heurística de (Merlin and Back, 1975). Portanto, uma generalização da proposta de Merlin e Back é montada. Levando-se em conta que existe disponível a informação dos fluxos de potência aparente nos ramos do sistema malhado, a fase construtiva do GRASP assume a seguinte forma:

1. Incorporar à topologia radial em construção os ramos identificados no pré-processamento;
2. Identificar os ramos que ainda são candidatos à adição na topologia radial em construção;
3. Montar a lista RCL formada por um subconjunto dos ramos identificados no passo anterior;
4. Escolher aleatoriamente um ramo da lista RCL e adicionar esse ramo à topologia radial em construção. Retirar esse ramo da lista RCL, assim como os ramos candidatos que podem gerar laços com o ramo adicionado. Este passo implica em atualizar o vetor que armazena a topologia radial;
5. Se todos os ramos já foram escolhidos (incorporados na topologia radial ou armazenados como ramos que devem ficar abertos), então pare, pois foi gerada uma proposta de solução radial. Caso contrário volte ao passo 2.

Na estratégia mostrada anteriormente, apenas o passo 3 necessita de detalhamento, do ponto de vista conceitual.

Supor que R é o conjunto de ramos que são candidatos à adição na topologia radial em construção. Seja S_{ij} o fluxo de potência aparente pelo ramo ij encontrado na fase de pré-processamento e $\underline{S}_{ij}$ e $\bar{S}_{ij}$ o menor e maior valor de fluxo de potência aparente, dentre os ramos em R , respectivamente. Nesse contexto, os ramos que pertencem ao conjunto RCL são encontrados usando a relação (12).

$$RCL = \{ij \in R | \underline{S}_{ij} + \alpha(\bar{S}_{ij} - \underline{S}_{ij}) \leq S_{ij} \leq \bar{S}_{ij}\} \quad (12)$$

A relação (12) permite identificar o conjunto de ramos promissores que pertencem ao conjunto RCL e que podem ser escolhidos para serem adicionados à topologia radial em construção. Pode-se verificar que se $\alpha = 0$, todos os ramos de R são candidatos e, portanto, a estratégia de escolha é totalmente aleatória. Por outro lado, se $\alpha = 1$, apenas o ramo com maior fluxo de potência aparente faz parte do conjunto RCL e, portanto, a estratégia de escolha de ramos é totalmente gulosa, como acontece em um algoritmo heurístico construtivo. Dessa forma uma escolha adequada de α , por exemplo $\alpha = 0,5$, permite gerar um

conjunto reduzido de elementos de RCL que representa uma estratégia que incorpora componente aleatória e gulosa.

Na estratégia apresentada, deve-se observar que mesmo que o valor de α seja constante durante toda a fase construtiva do GRASP, o número de elementos da lista RCL pode ser diferente em cada passo da fase construtiva, pois o número de elementos da lista RCL depende também dos valores de $\underline{S}_{ij}$ e $\bar{S}_{ij}$ em cada iteração. Desta forma a natureza adaptativa do GRASP se encontra presente na fase construtiva proposta.

Em conclusão, a informação relevante usada é a da distribuição de fluxos aparentes nos ramos do sistema de distribuição malhado, encontrada na fase de pré-processamento. Essa estratégia torna a implementação da fase construtiva muito rápida pois cada passo termina com a geração de uma topologia radial de boa qualidade e essa topologia é melhorada na fase de busca local.

4.4 Fase de Melhoria Local

A fase de melhoria local é basicamente um algoritmo de busca em vizinhança, isto é, um algoritmo *Steepest Descent Heuristic*, o qual começa o processo de otimização a partir de uma proposta de solução inicial e, para implementar tal heurística, uma vizinhança deve ser definida. Neste trabalho a proposta de solução inicial é gerada na fase construtiva.

A vizinhança usada neste trabalho consiste apenas na troca de um ramo fechado por um ramo de ligação do mesmo laço. A Figura 1 permite ilustrar a vizinhança usada. Assim, o laço L1 é formado pelos ramos fechados 1-2, 2-5, 1-3, 3-6 e 6-9 e o ramo de ligação 5-9. Assim, fechando-se o ramo 5-9 podem ser abertos, de forma independente, os ramos 1-2, 2-5, 1-3, 3-6 ou 6-9. Analisando o laço L1 são geradas 5 soluções radiais vizinhas. Dessa forma, considerando os 3 laços do sistema da Figura 1, verifica-se que a solução radial mostrada tem 15 soluções radiais vizinhas. A transição é realizada para a melhor solução radial vizinha.

A fase de melhoria local assume a seguinte forma:

1. Transformar a proposta de solução encontrada na fase construtiva na proposta de solução corrente;
2. Encontrar, analisar e avaliar todas as soluções vizinhas da solução corrente e identificar a melhor solução vizinha;
3. Se a melhor solução vizinha for melhor que a solução corrente, então atualizar a solução corrente, isto é, a melhor solução vizinha se transforma na solução corrente, e voltar ao passo 2. Em caso contrário, terminar o processo de otimização.

No algoritmo de busca local, avaliar um vizinho significa calcular um fluxo de carga radial correspondente à topologia radial vizinha identificada. Portanto, no passo 2, deve-se calcular um número de fluxos de carga para sistemas radiais igual ao número de vizinhos identificados.

5 Testes e Resultados

O algoritmo GRASP proposto foi implementado em linguagem MATLAB® versão R2017a e os testes foram realizados utilizando-se um computador com um processador Intel® Core™ i7-7700 de 3,6 GHz e 16 GB de RAM. Para analisar o desempenho do algoritmo, testes foram realizados com os sistemas de 84 barras (Chiou, Chang and Su, 2005) e 136 barras (Mantovani, Casari and Romero, 2000). Nos testes, considera-se o valor de $V = 0,93$ p.u., de acordo com as normas brasileiras. Em ambos os testes o número de iterações do algoritmo GRASP foi escolhido igual a dez e o parâmetro α foi ajustado em 0,3.

5.1 Sistema de 84 Barras

O primeiro sistema testado possui 83 barras de carga, uma barra de subestação e 96 ramos. A tensão na subestação é 11,40 kV. As demandas totais de potência ativa e reativa são, respectivamente 28351 kW e 20700 kVar. A tensão mínima no sistema inicial é 0,9285 p.u. O sistema possui 13 circuitos de ligação, sendo que os circuitos 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95 e 96 encontram-se inicialmente abertos. As perdas para o caso base são 531,9975 kW. Este sistema possui $3,5196 \times 10^{11}$ topologias radiais (Harris, Hirst, and Mossinghoff, 2008).

O algoritmo GRASP encontrou a melhor solução conhecida para o problema em 2,29 s, resolvendo um total de 9826 fluxos de carga. A Figura 3 mostra a evolução do algoritmo, solução incumbente de cada iteração em função do número de cálculos da função objetivo, em um teste realizado.

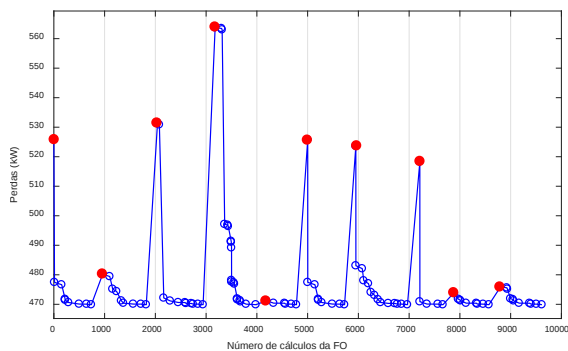


Figura 3. Evolução do algoritmo GRASP para o sistema de 84 barras

Na Figura 3 pode-se verificar todas as dez vezes em que a fase construtiva é realizada (pontos de maiores valores de perdas, indicados pelos pontos vermelhos), bem como a evolução de cada vez que a melhoria local é utilizada (pontos com valores decrescentes a partir da solução da fase construtiva).

A solução obtida pelo algoritmo GRASP, com as chaves 7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90 e 92 abertas, apresenta perdas de 469,8799 kW, o que representa uma redução de 11,68% em relação à configuração inicial, com tensão mínima de 0,9532 p.u.

A Figura 4 apresenta os perfis de tensão no sistema de 84 barras antes e depois da reconfiguração. Com esta, a operação do sistema deixa de ser ineficiente em relação à restrição de limite de tensão nas barras.

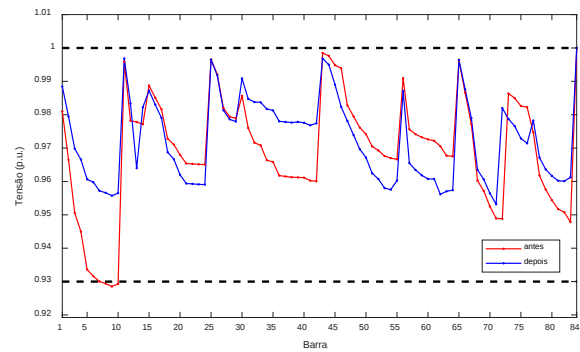


Figura 4. Perfil de magnitude de tensão no sistema de 84 barras antes e depois da reconfiguração

5.2 Sistema de 136 Barras

O segundo sistema testado possui 135 barras de carga, duas barras de subestação e 156 ramos. A tensão na subestação é 13,80 kV. As demandas totais de potência ativa e reativa são, respectivamente 18313,81 kW e 7932,53 kVar. A tensão mínima no sistema inicial é 0,9307 p.u. O sistema possui 21 circuitos de ligação, sendo que os circuitos 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155 e 156 encontram-se inicialmente abertos. As perdas para o caso base são 320,3644 kW. Este sistema possui $2,2686 \times 10^{18}$ topologias radiais (Harris, Hirst, and Mossinghoff, 2008).

O algoritmo GRASP encontrou a melhor solução conhecida para o problema em 9,31 s, resolvendo um total de 29514 fluxos de carga. A Figura 5 mostra a evolução do algoritmo, solução incumbente de cada iteração em função do número de cálculos da função objetivo.

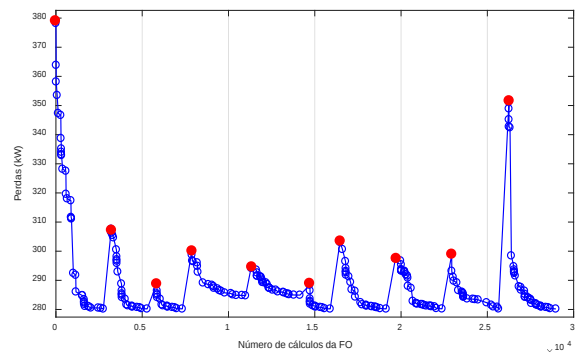


Figura 5. Evolução do algoritmo GRASP para o sistema de 136 barras

A solução obtida pelo algoritmo GRASP, com as chaves 7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151 e 155

abertas apresenta perdas de 280,1930 kW, o que representa uma redução de 12,54% em relação à configuração inicial, com tensão mínima de 0,9589 p.u.

A Figura 6 apresenta os perfis de tensão no sistema de 136 barras antes e depois da reconfiguração. Nota-se que o perfil de tensão é melhorado consideravelmente.

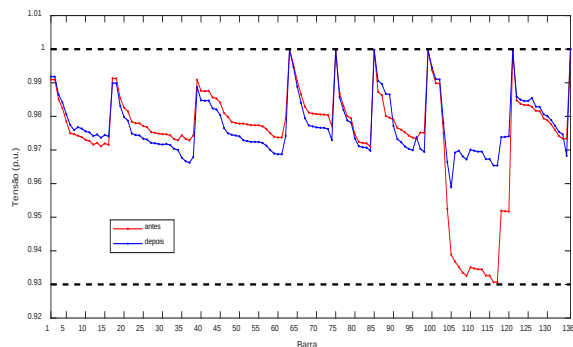


Figura 6. Perfil de magnitude de tensão no sistema de 136 barras antes e depois da reconfiguração

6 Conclusão

Este trabalho apresentou um algoritmo GRASP especializado para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica radiais.

A fase construtiva do algoritmo proposto, para obtenção de soluções de boa qualidade, mostrou-se eficiente, gerando soluções com diversidade e relativamente próximas da solução ótima do problema. Desta forma, a etapa de melhoria local foi capaz de encontrar soluções de excelente qualidade.

Os testes realizados com os sistemas de 84 e 136 barras indicam o bom desempenho do método proposto, sendo que as melhores soluções conhecidas para ambos os sistemas foram encontradas.

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), processos nº 2014/23741-9, 2015/21972-6 e 2017/11902-6.

Referências Bibliográficas

Baran, M. E. and Wu, F. F. (1989). Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 2, pp. 1401–1407.

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.

Chiou, J. P.; Chang, C. F. and Su, C. T. (2005). Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No. 2, pp. 668–674.

Civanlar, S.; Grainger, J. J.; Yin, H. and Lee, S. S. H. (1988). Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, No. 3, pp. 1217–1223.

Feo, T. A. and Resende, M. G. C. (1995). Greedy randomized adaptive search procedures. *Journal of Global Optimization*, Vol. 6, No. 2, pp. 109–133.

Glover, F. and Kochenberger, G. (2003). *Handbook of metaheuristics*. Kluwer Academic Publishers, New York-NY.

Harris, J. M.; Hirst, J. L. and Mossinghoff, M. J. (2008). *Combinatorics and graph theory*. Springer, 2nd edition, New York-NY.

Lavorato, M.; Franco, J. F.; Rider, M. J. and Romero, R. (2012). Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 27, No. 1, pp. 172–180.

Mantovani, J. R. S.; Casari, F. and Romero R., (2000). Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. *SBA Controle e Automação*, Vol. 11, No. 2, pp. 150–159.

Mendoza, J.; Lopez, R.; Morales, D.; Lopez, E.; Dessante, P. and Moraga, R. (2006). Minimal loss reconfiguration using genetic algorithms with restricted population and addressed operators: real application. *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.

Ritter, D.; Franco, J. F. and Romero, R. (2015). Analysis of the radial operation of distribution systems considering operation with minimum losses. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 67, pp. 453–461.

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.