

Reconfiguração Multiobjetivo de Redes Radiais de Distribuição de Energia Elétrica

Lucas S. M. Guedes^{†*}, Adriano C. Lisboa^{†*}, Douglas A. G. Vieira^{†*}, Rodney R. Saldanha[†]

[†]Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil

* ENACOM Handcrafted Technologies

Rua Prof. José Vieira de Mendonça 770, 31310-260, Belo Horizonte, MG, Brasil

lucas.guedes@enacom.com.br, adriano.lisboa@enacom.com.br,

douglas.vieira@enacom.com.br, rodney@cpdee.ufmg.br

Rodrigo Moreira Romano, Luciana Lopes Afonso Gaspar

Light S.A.

Av. Marechal Floriano 168, 20080-002, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

rodrigo.romano@light.com.br, luciana.afonso@light.com.br

RESUMO

Este trabalho apresenta uma nova heurística de reconfiguração de redes radiais de distribuição de energia elétrica, com objetivo de reduzir a perda resistiva e a sobrecorrente máxima, baseada na estratégia *branch-and-bound*. Uma versão multiobjetivo da estratégia GRASP, especializada em reconfiguração, é proposta. Os dois métodos são testados em quatro sistemas de distribuição de médio porte.

PALAVRAS CHAVE. Reconfiguração, Heurística, GRASP.

EN – PO na Área de Energia, OC – Otimização Combinatória

ABSTRACT

This work presents a new reconfiguration heuristic of electrical radial networks in order to reduce the total power loss and the maximum overcurrent, based on the branch-and-bound strategy. A version of the multiobjective GRASP, specialized for reconfiguration, is proposed. Both methods are tested on four medium size distribution systems.

KEYWORDS. Reconfiguration, Heuristic, GRASP.

EN – OR in Energy, OC – Combinatorial Optimization

1. Introdução

As redes de distribuição de energia elétrica são sujeitas a falhas mais frequentes do que a rede de transmissão, devido à sua estrutura ser menos redundante. Além disso, elas respondem por uma grande parcela dos custos totais do sistema e, normalmente, exigem um grande investimento. Tais características demandam dos operadores do setor elétrico estudos de planejamento e otimização desse subsistema.

O sistema de distribuição possui uma estrutura fracamente reticulada, mas sua operação é realizada através de uma estrutura radial, com o objetivo de simplificar os regimes de proteção. As chaves (interruptores), distribuídas pela rede, são as responsáveis pela topologia. Assim, o sistema conta com chaves normalmente fechadas e normalmente abertas.

A reconfiguração da rede é realizada pela alteração dos estados das chaves. No contexto de otimização, o objetivo é identificar quais chaves devem ser abertas e fechadas para se alcançar configuração ótima. As redes podem ser avaliadas segundo a perda de potência, o equilíbrio de carga, as sobrecorrentes, etc.

O problema de reconfiguração tem natureza combinatória devido às operações de chaveamento. Além disso, o sistema deve respeitar as equações não lineares de fluxo de potência e os limites técnicos, tais como os limites de corrente e tensão. Em resumo, a reconfiguração é um problema de otimização combinatória, não linear e multiobjetivo. Estas características, associadas com escalados sistemas reais, levaram ao desenvolvimento de diversas heurísticas e metaheurísticas.

No trabalho de Schmidt *et al.* (2005), os autores propuseram uma heurística do tipo abertura sequencial de chaves. Todas as chaves iniciam fechadas e, a cada iteração, abre-se uma chave até a rede se tornar radial. Gomes *et al.* (2006) também apresentou um método baseado nessa técnica. Esse método demanda a resolução de fluxo de potência em redes não radiais, que demanda maior esforço computacional que o caso de redes radiais.

A heurística construtiva consiste no processo inverso, ou seja, a rede inicial é obtida pela desconexão de todas as chaves e de todas as cargas. A cada iteração as cargas são conectadas e as chaves fechadas até uma configuração radial. Os trabalhos de McDermott *et al.* (1999) e Lopez *et al.* (2002) utilizaram tal método.

Na permuta de ramos, inicia-se com uma rede radial, e a cada iteração um par de chaves é escolhido. Esse par consiste em uma chave aberta, que será fechada, e de uma chave fechada, que será aberta. Ao fim das iterações, a rede continua factível e com menor valor de função objetivo. Os trabalhos de Mantovani *et al.* (2000) e Ababei e Kavasseri (2011) aplicaram a permuta de ramos.

Um algoritmo genético multiobjetivo foi desenvolvido por Mendoza *et al.* (2009) e Santos *et al.* (2010). Um algoritmo evolucionário especializado na redução de perdas foi apresentado por Carreño *et al.* (2007). Liet *et al.* (2004) aplicou lista tabu, e Chiang e Jean-Jumeau (1990) propuseram a união do método epsilon-restrito e recozimento simulado para o problema multiobjetivo. Oliveira *et al.* (2011) aplicou a estratégia GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) para a reconfiguração monoobjetivo. A primeira fase do algoritmo, responsável por encontrar uma rede viável, foi baseada na heurística de abertura sequencial de chaves, e a fase de melhoria, na permutação de ramos.

Neste trabalho, apresenta-se uma formulação multiobjetivo para a minimização das perdas e da máxima sobrecorrente. Uma nova e eficiente heurística baseada na permuta de ramos, no método *branch-and-bound* e na dominância Pareto é apresentada. Esse método é comparado com uma versão multiobjetivo da metaheurística GRASP.

2. Formulação do problema de reconfiguração de redes

O sistema de distribuição pode ser modelado como um grafo não direcionado e conectado $\mathcal{G}(\mathbb{V}, \mathbb{E})$, onde \mathbb{V} é o conjunto de n_V vértices com demandas de carga, $S = P + jQ$, incluindo os n_R alimentadores. As chaves são representadas pelo conjunto \mathbb{E} dos n_E ramos, associados com as impedâncias em série, $Z = R + jX$. Quando todas as chaves estão fechadas, a

rede se torna malhada, logo, $n_E \geq n_V - n_R$.

O sistema será representado em uma base por fase e as cargas como cargas constantes localizadas no final dos ramos. A demanda de carga é conhecida e fixa durante o período de planejamento. As arestas podem ser (i) manobráveis, que aceitam os estados fechado e aberto, ou (ii) fixas, que possuem um estado fixo. O segundo tipo de aresta representa uma restrição, já que não realizam a operação de chaveamento.

Na estrutura de operação, cada alimentador deve alimentar um subconjunto independente de cargas através de uma topologia radial (árvore), ao abrir um grupo de chaves de interconexão manobráveis. Essa configuração é definida como uma floresta $\mathcal{F}(\mathbb{V}, \mathbb{A})$, constituída de n_R árvores independentes, que conecta todos os vértices do conjunto \mathbb{V} e possui $n_A = n_V - n_R$ arestas. O conjunto \mathbb{A} de arestas é um subconjunto de \mathbb{E} , e representa as chaves de interconexão fechadas. Além da radialidade, uma topologia \mathcal{F} deve respeitar as restrições de fluxo de potência.

As equações de fluxo de potência são a tradução da primeira lei de Kirchhoff, que estabelece a conservação de energia em cada vértice. Em outras palavras, a potência injetada diretamente por uma fonte alimentadora menos a potência demandada deve ser igual à diferença entre a potência que sai e entra do vértice.

Essas equações são resolvidas devido à condição de contorno que fixa a tensão nos alimentadores. Dessa forma, a tensão V nos vértices e a corrente I nos ramos são calculadas. A rede será considerada factível se a tensão permanecer dentro do intervalo de qualidade, $[V_{\min}, V_{\max}]$, e se as correntes respeitarem os limites de condução dos cabos, $[0, I_{\max}]$.

As redes são avaliadas segundo as perdas resistivas e o maior nível de sobrecorrente em relação à corrente nominal I_{nom} ,

$$\min f_1(x) = \sum_{(i,j) \in \mathbb{E}} R_{ij} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2(x)},$$

$$f_2(x) = \max_{k \in \mathbb{E}} (I_k(x) / I_{\text{nom},k}),$$

onde o vetor de variáveis x indica o estado das chaves. Caso a chave esteja fechada, $x = 1$, e iguala zero, caso contrário.

Essa formulação multiobjetivo busca encontrar soluções de equilíbrio entre os compromissos de reduzir os custos e aumentar a confiabilidade do sistema. A minimização da perda resistiva implica na redução de custos devido ao desperdício de energia, enquanto que a minimização da máxima sobrecarga nas arestas implica em um sistema mais confiável. Isto é interessante no nível de planejamento uma vez que a variação da carga é desconhecida e sujeita a expansões.

Dado o sistema de distribuição \mathcal{G} , a demanda de carga S , a impedância Z e os limites técnicos, o problema de reconfiguração define um conjunto finito de configurações viáveis como espaço de busca. Deve-se determinar um subconjunto ótimo de redes não dominadas \mathbb{P}^* , denominado conjunto Pareto ótimo. Sejam duas redes viáveis \mathcal{F}_1 e \mathcal{F}_2 , representadas pelos vetores de variáveis x_1 e x_2 , dizemos que \mathcal{F}_1 Pareto domina \mathcal{F}_2 se $f_1(x_1) \leq f_1(x_2)$, $f_2(x_1) \leq f_2(x_2)$, $f_1(x_1) \neq f_1(x_2)$ e $f_2(x_1) \neq f_2(x_2)$.

3. Heurística multiobjetivo para reconfiguração

A heurística desenvolvida baseia-se nos métodos de enumeração, largamente aplicados em problemas discretos. O espaço de busca do problema de reconfiguração aumenta exponencialmente, o que inviabiliza uma enumeração completa. Desta forma, tais métodos devem ser capazes de enumerar apenas um subconjunto promissor. Dentro desta classe, destaca-se o *branchandbound*.

A estratégia *branchandbound* constrói uma árvore de busca, baseada nos agrupamentos formados por um nó e seus ramos. O nó representa uma solução para o problema e dele pode-se construir outras soluções, as ramificações. A árvore se inicia no nível zero, com uma solução

inicial, e a cada novo nível, acrescentam-se novas soluções ramificadas (*branch*). Como o espaço de busca, essa árvore também sofre uma explosão combinatória, por isso foram desenvolvidas diversas técnicas de poda baseados na dominância Pareto e nas restrições (*bound*). Em outras palavras, a ramificação será realizada apenas nos nós promissores, ou seja, aqueles que representam novas redes factíveis e não dominadas, como ilustrado na Figura 1.

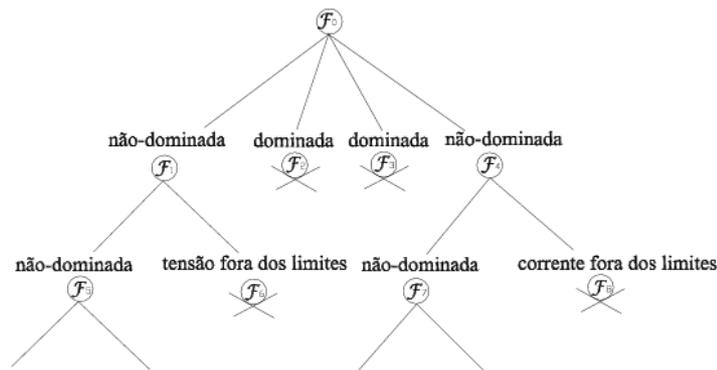


Figura 1. Esquema da heurística multiobjetivo.

O movimento base de ramificação é a permuta de ramos, que consiste em passar da atual configuração \mathcal{F} para uma nova rede através da abertura de uma chave e do fechamento de outra.

Ao se fechar uma chave, um novo ramo (i, j) é adicionado à rede e um *loop* entre as respectivas raízes dos vértices i e j é formado. Esse ciclo pode ser dividido em duas partes, a primeira de i para a respectiva raiz, e a segunda a partir de j até a respectiva raiz. A topologia radial pode ser restaurada através da abertura de uma chave em qualquer um dos caminhos.

A fim de simplificar o controle de radialidade, um procedimento para quebra do *loop* foi desenvolvido. Após fechar uma chave aberta, todas as chaves do *loop* são classificadas como habilitadas ou não. As chaves fixas são sempre classificadas como não habilitadas. No caso de ambos os vértices possuírem a mesma raiz, as chaves manobráveis pertencentes aos dois caminhos também são classificadas como não habilitadas.

Então, a primeira chave habilitada no caminho entre i e a respectiva raiz é selecionada para ser aberta. Se todas as chaves nesse caminho são não habilitadas, essa operação de permutação é cancelada. Caso contrário, uma novarede é construída a partir de \mathcal{F} . O mesmo procedimento para desfazer o *loop* é repetido no caminho de j até sua raiz.

No método proposto, para cada redena árvore de busca, todas as suas chaves abertas serão individualmente fechadas para a geração de novas configurações. Como visto, geram-se no máximo duas novas redes para cada chave aberta.

As equações de fluxo de potência são então resolvidas para as novas redes radiais. O problema do fluxo de potência pode ser decomposto para cada árvore da floresta, e resolvidos separadamente, já que a solução em cada vértice é baseada na tensão do respectivo alimentador. Assim, a fim de reduzir o esforço computacional, o método proposto por Teng(2003) é executado apenas para os alimentadores cuja rede foi alterada.

O método de fluxo de potência retornará o perfil de tensão V e as correntes I . Caso as tensões e as correntes estiverem fora dos limites técnicos, a rede será podada. Caso contrário, calcula-se o vetor de funções objetivo, e verifica-se a dominância Pareto.

Em resumo, a cada nível k da árvore de busca, um novo conjunto de configurações filhas \mathbb{T} é gerado a partir das configurações não dominadas do nível anterior. Essas novas redes serão adicionadas ao atual conjunto Pareto, e então, serão selecionadas apenas as não dominadas, $\mathbb{P}_k \subseteq \mathbb{P}_{k-1} \cup \mathbb{T}$. As novas redes não dominadas, $\mathbb{L} = \mathbb{T} \in \mathbb{P}_k$, serão ramificadas na próxima iteração. O conjunto Pareto é inicializado com a configuração inicial, $\mathbb{P}_0 = \mathcal{F}_0$. O processo se

encerra quando \mathbb{L} se torna vazia. A heurística retorna a fronteira Pareto do último nível. O pseudocódigo se encontra no Algoritmo 1.

<p>Entrada: $\mathcal{G}, \mathcal{F}_0, S, Z, V_{\min}, V_{\max}, I_{\max}$ Saída: \mathbb{P}_k</p> <p>1: $k \leftarrow 0$ 2: $\mathbb{P}_0 \leftarrow \mathcal{F}_0, \mathbb{L} \leftarrow \mathcal{F}_0, \mathbb{T} \leftarrow \emptyset$ 3: enquanto $\mathbb{L} \neq \emptyset$ faça 4: Escolha $\mathcal{F} \in \mathbb{L}$ 5: para toda rede \mathcal{F}_i filha de \mathcal{F} faça \triangleright Permuta de ramos 6: se \mathcal{F}_i é radial então \triangleright Senão poda 7: Execute o método de fluxo de potência para \mathcal{F}_i 8: se $V \in [V_{\min}, V_{\max}]$ e $I \in [0, I_{\max}]$ então \triangleright Senão poda 9: Avalie f_1 e f_2 10: $\mathbb{T} \leftarrow \mathbb{T} \cup \mathcal{F}_i$ 11: fim se 12: fim se 13: fim para \triangleright Fim da ramificação 14: $\mathbb{L} \leftarrow \mathbb{L} / \mathcal{F}$ 15: se $\mathbb{L} = \emptyset$ então \triangleright Fim do nível 16: $\mathbb{P}_{k+1} \leftarrow$ conjunto não dominado de $\mathbb{P}_k \cup \mathbb{T}$ 17: $\mathbb{L} \leftarrow \mathbb{T} \in \mathbb{P}_{k+1} \triangleright$ Poda redes dominadas 18: $\mathbb{T} \leftarrow \emptyset, k \leftarrow k + 1$ 19: fim se 20: fim enquanto</p>
--

Algoritmo 1: Heurística multiobjetivo

4. GRASP multiobjetivo para reconfiguração

A estratégia GRASP possui duas fases, sendo a primeira baseada em um algoritmo construtivo guloso e, a segunda baseada em uma busca local. A principal diferença do método está na heurística construtiva que passa a combinar um caráter randômico com o guloso, permitindo a geração de diferentes soluções factíveis e de boa qualidade. Esse método foi apresentado por Feo Resende (1989). Essa estratégia apresentou bons resultados em problemas combinatoriais não lineares, como o problema de atribuição quadrático em *Liet al.* (1994). Recentemente, o GRASP foi aplicado ao problema de minimização de perdas em redes de distribuição em *Oliveira et al.* (2011), na qual o atual algoritmo é baseado.

No problema de reconfiguração de redes, o método de abertura sequencial de chaves constrói soluções viáveis de boa qualidade a partir do sistema inicialmente malhado, ou seja, com todas as chaves fechadas. A cada iteração dessa heurística, uma chave é escolhida para ser aberta de forma gulosa, com intuito de gerar o menor impacto na função objetivo. Na maioria das aplicações, abre-se a chave na qual atravessa o menor fluxo de potência. Após cada alteração na rede, as equações de fluxo de potência são reavaliadas, e verifica-se a viabilidade. O algoritmo se encerra ao encontrar uma rede radial e factível.

Neste trabalho, a abertura sequencial de chaves foi adaptada para se tornar a primeira fase do GRASP. A cada iteração, define-se uma lista de chaves candidatas. Uma chave é candidata caso a sua abertura não isole um subconjunto de cargas. A lista é então ordenada pelos valores do fluxo de potência que atravessa cada chave. Por fim, o algoritmo cria a lista de candidatas restrita às α melhores opções, e então, a escolha da chave é aleatória. O parâmetro α pode assumir valores entre zero e um, onde zero torna o método uma heurística gulosa tradicional e $\alpha = 1$, em uma construção completamente aleatória.

Após a abertura da chave, as equações de fluxo de potência são resolvidas para a nova

rede. Utilizou-se o algoritmo de pontos interiores desenvolvido por Wang *et al.*(2007), devido sua alta taxa de convergência e baixo tempo computacional na resolução de redes não radiais. Na última iteração, quando a topologia se torna radial, o fluxo de potência é resolvido pelo método de Teng(2003).

A segunda etapa é uma busca local Pareto que mapeia as soluções não dominadas na vizinhança da solução inicial. O movimento base é a permuta de ramos, como descrito na heurística multiobjetivo. Dado uma rede \mathcal{F} factível, inicia-se o processo de ramificação das soluções filhas, \mathcal{F}_i . Se \mathcal{F}_i domina a solução \mathcal{F} , o processo de ramificação recomeça com $\mathcal{F} \leftarrow \mathcal{F}_i$. Logo, a busca local utiliza a estratégia de primeira melhoria. A cada ramificação, também é verificado se a nova rede é não dominada, atualizando-se sempre o conjunto Pareto local. O processo é exaustivo, ou seja, se encerra quando não há mais ramificações para realizar.

Ao fim de cada iteração k do GRASP, a fronteira Pareto da busca local \mathbb{T} é comparada com o Pareto das iterações anteriores \mathbb{P}_{k-1} . O algoritmo retorna apenas as soluções não dominadas de todas as iterações, como detalhado no Algoritmo 2.

Entrada: $\mathcal{G}, S, Z, V_{\min}, V_{\max}, I_{\max}, Maxiter, \alpha$
Saída: \mathbb{P}_k

1: $k \leftarrow 0, \mathbb{P}_0 \leftarrow \emptyset, \mathbb{T} \leftarrow \emptyset$
2: **para** k **de** 1 **até** $Maxiter$ **faça**
3: $\mathcal{F} \leftarrow$ AberturaSequencialRandômica($\mathcal{G}, S, Z, V_{\min}, V_{\max}, I_{\max}, \alpha$)
4: $\mathbb{T} \leftarrow$ BuscaParetoLocal($\mathcal{G}, \mathcal{F}, S, Z, V_{\min}, V_{\max}, I_{\max}$)
5: $\mathbb{P}_k \leftarrow$ conjunto não dominado de $\mathbb{P}_{k-1} \cup \mathbb{T}$
6: **fim para**

Algoritmo 2: GRASP multiobjetivo

5. Resultados

A heurística multiobjetivo e o GRASP foram testados em 4 instâncias. Testou-se, também, a estratégia GRASP com diferentes valores do parâmetro α (0.25, 0.5, 0.75 e 1.0). O número de iterações foi fixado em 30 ($Maxiter$) e a metaheurística foi executada 30 vezes para se obter a fronteira Pareto final. Os resultados são apresentados em valores por unidade.

5.1. Instância de 33 nós

A primeira instância possui 32 cargas, 37 chaves e, originalmente, 1 alimentador. Os dados referentes a impedância, a demanda de potência e aos limites técnicos se encontram no trabalho de Mendonza *et al.* (2009). Nesse teste, mais um alimentador foi conectado à rede, junto à carga número 16, para ampliar a fronteira Pareto.

O parâmetro α apenas modificou a dimensão da fronteira Pareto, sendo de 14 pontos para α igual 0.25 e 0.5, de 18 para $\alpha = 0.75$ e 17 para $\alpha = 1$. Os resultados do GRASP ($\alpha = 0.75$) e da heurística estão na Figura 1. O primeiro executou em média 1703 fluxos de potência em redes radiais e 209 não radiais, enquanto a heurística necessitou apenas de 202 fluxos de potência radiais.

5.3. Instância de 69 nós

Os dados desse sistema se encontram no trabalho de Savier e Das (2007). A rede original possui apenas um alimentador, 68 cargas e 73 chaves. Adicionou-se, também, um novo alimentador, conectado a carga número 69.

A variação do parâmetro α não impacta na qualidade da fronteira Pareto, apenas na quantidade de pontos mapeados. O GRASP retornou 28 soluções com $\alpha = 0.25$, 39 com $\alpha = 0.5$, 44 com $\alpha = 0.75$ e 51 com $\alpha = 1$.

Na Figura 2, a fronteira Pareto da heurística e do GRASP ($\alpha = 0.5$) são comparadas. A heurística mapeia 56 pontos ao avaliar 1679 redes radiais, enquanto que a segunda estratégia avalia em média 1154 redes radiais e 183 redes não radiais.

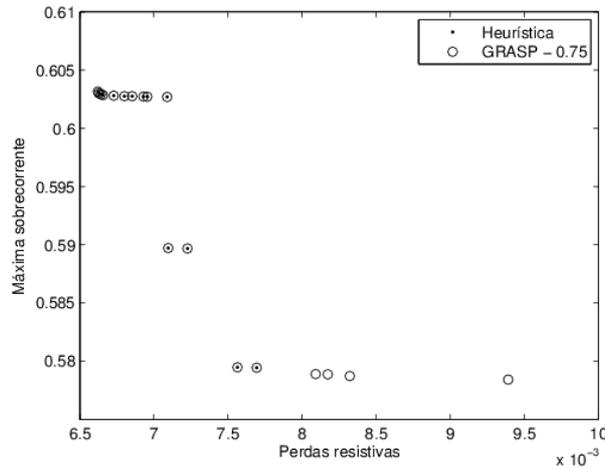


Figura 1. Fronteira Pareto da heurística e do GRASP para instância de 33 nós.

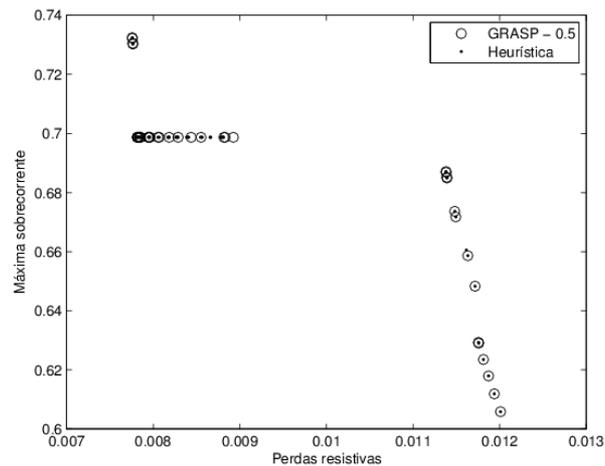


Figura 2. Fronteira Pareto da heurística e do GRASP para instância de 69 nós.

5.2. Instância de 94 nós

A terceira instância utilizada foi retirada de Suet *al.* (2005). O sistema contém 11 alimentadores, 83 cargas e 96 chaves. Definiu-se a corrente máxima e nominal igual à 1p.u. em todas as arestas.

A estratégia GRASP retornou os mesmos dois pontos Pareto para todos os valores do parâmetro α . Dessa forma, foi escolhido o valor 0.5 para ser comparado com a heurística na Figura 3. O GRASP realizou em média 4878 fluxos de potência em rede radial e 765 em rede malhada. Com apenas 528 redes radiais avaliadas, a heurística encontrou dois pontos dominados pela fronteira do GRASP. Entretanto, as diferenças em perdas resistivas não ultrapassam 4%.

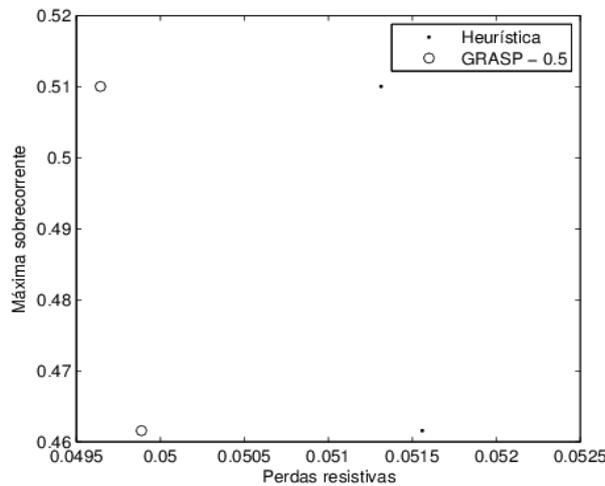


Figura 3. Fronteira Pareto da heurística e do GRASP para instância de 94 nós.

5.3. Instância de 135 nós

Essa instância foi retirada do trabalho de Mantovani *et al.* (2000). O sistema é composto de 127 cargas, oito alimentadores e considerou-se que todas as arestas possuíam chaves, ou seja, 156 ao todo. O valor da corrente nominal foi definido como 0.5p.u. para todas as linhas.

O parâmetro α impactou na qualidade das soluções, como ilustrado na Figura 4. A melhor calibragem foi $\alpha = 0.25$.

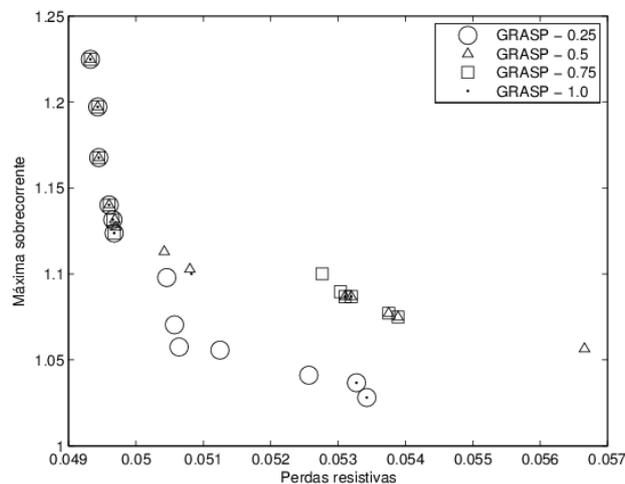


Figura 4. Fronteira Pareto para instância de 135 nós para o GRASP.

Os resultados na Figura 5 mostram que a heurística alcançou um melhor resultado nesse teste, já que a metaheurística mapeou soluções dominadas. As soluções foram retornadas pela heurística após 5915 fluxos de potência radial. O GRASP avaliou em média 2455 redes radiais e 2289 não radiais.

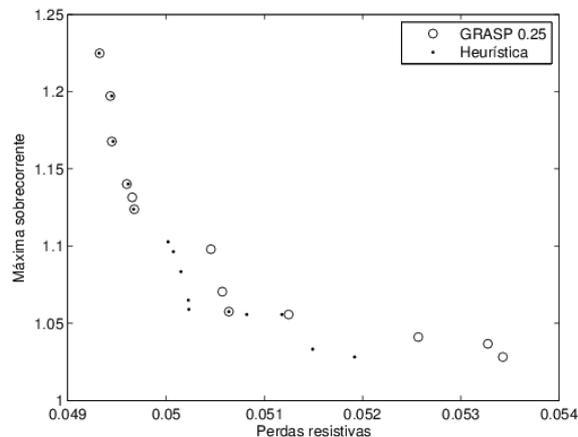


Figura 5. Fronteira Pareto da heurística e do GRASP para instância de 135 nós.

6. Conclusões

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de métodos para a reconfiguração multiobjetivo de redes radiais de distribuição de energia elétrica. O problema visa à minimização da perda resistiva e da máxima sobrecarga nas arestas em relação à corrente nominal. Essa formulação busca encontrar soluções de equilíbrio entre o compromisso de reduzir os custos e aumentar a confiabilidade do sistema. A análise posterior das soluções não dominadas propicia ao operador, por exemplo, estabelecer o nível de sobrecarga aceitável para reduzir as perdas ou priorizar redes com baixa sobrecorrente para cenários de expansão.

A heurística multiobjetivo desenvolvida baseia-se na estratégia *branch-and-bound*, que utiliza uma árvore e limites de poda para organizar o processo de busca. A árvore de busca neste trabalho é construída através da técnica de permuta de ramos nas redes. As restrições de dominância Pareto são responsáveis pela poda da árvore de busca. Assim, a sequência de chaveamentos conduz naturalmente o conjunto de soluções para a fronteira Pareto, como observado nos testes realizados.

Esse método foi comparado com uma versão multiobjetivo do GRASP para reconfiguração de redes radiais. Na primeira fase, a heurística de abertura sequencial de chaves foi adaptada para combinar seu comportamento guloso com aleatoriedade, tornando-se capaz de gerar diferentes soluções iniciais factíveis e de boa qualidade. A segunda etapa realiza uma busca local através da técnica de permuta de ramos. O objetivo é encontrar as soluções não dominadas na vizinhança das soluções iniciais.

Os resultados demonstram a capacidade do GRASP e da heurística de mapear a fronteira Pareto de forma diversificada de boa qualidade. A heurística, por sua característica descendente e sua dependência de uma solução inicial, pode em algumas situações retornar um Pareto local. Entretanto, esse método realiza apenas fluxos de potência em redes radiais, enquanto que a primeira fase do GRASP executa fluxo de potência em redes não radiais, cuja complexidade é maior que no caso radial. Dessa forma a heurística retorna suas soluções com menor tempo de execução.

Como trabalhos futuros, um método exato para a reconfiguração multiobjetivo pode ser desenvolvido a partir dos conceitos de enumeração, cortes e dominância Pareto. A sensibilidade da reconfiguração em relação às alterações nos padrões de carga também pode ser estudada para tornar a etapa de planejamento mais robusta. Novas estratégias para as fases do GRASP também podem ser testadas para refinar seu desempenho.

Agradecimentos

O presente trabalho é parte de um projeto de P&D ANEEL proposto pela Light SA, e também apoiado pela CAPES, FAPEMIG e CNPq – Brasil.

Referências

- Ababei, C. e Kavasseri, R.** (2011), Efficient Network Reconfiguration Using Minimum Cost Maximum Flow-Based Branch Exchanges and Random Walks-Based Loss Estimations, *IEEE Transactions on Power Systems*, 26, 30-37.
- Carreño, E. M., Moreira, N. e Romero, R.** (2007), Distribution network reconfiguration using an efficient evolutionary algorithm, Proceedings of IEEE PES General Meeting, 1-6.
- Chiang, H. D. e Jean-Jumeau, R.** (1990), Optimal network reconfigurations in distribution systems. I. A new formulation and a solution methodology, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5, 1902-1909.
- Feo, T. A. e Resende, M. G. C.** (1989), A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem, *Operations Research Letters*, 8, 67-71.
- Gomes, F. V., Carneiro, S., Pereira, J. L. R., Vinagre, M. P., Garcia, P. A. N. e Araujo, L. R. D.** (2006), A New Distribution System Reconfiguration Approach Using Optimum Power Flow and Sensitivity Analysis for Loss Reduction, *IEEE Transactions on Power Systems*, 21, 1616-1623.
- Li, K. K., Chung, T. S., Chen, G. J. e Tang, G. Q.** (2004), A Tabu Search Approach to Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction, *Electric Power Components and Systems*, 32, 571-585.
- Li, Y., Pardalos, P. M. e Resende, M. G. C.** (1994), A Greedy Randomized Adaptive Search Procedure For The Quadratic Assignment Problem, DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science.
- Lin, W.-M.; Cheng, F.-S. e Tsay, M.-T.** (2000), Distribution feeder reconfiguration with refined genetic algorithm, *Iee Proceedings-Generation Transmission and Distribution*, 147, 349-354.
- Lopez, E.; Opazo, H.; Garcia, L. e Poloujadoff, M.** (2002), Minimal loss reconfiguration based on dynamic programming approach: Application to real systems. *Electric Power Components and Systems*, 30 (7), 693-704.
- Mantovani, J. R. S., Casari, F. e Romero, R. A.** (2000), Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão, *SBA Controle & Automação*, 11, 150-159.
- McDermott, T. E., Drezga, I. e Broadwater, R. P.** (1999), A heuristic nonlinear constructive method for distribution system reconfiguration, *IEEE Transactions on Power Systems*, 14, 478-483.
- Mendoza, J. E., Lopez, M. E., Coello, C. A. C. e Lopez, E. A.** (2009), Microgenetic multiobjective reconfiguration algorithm considering power losses and reliability indices for medium voltage distribution network, *IET Generation Transmission & Distribution*, 3, 825-840.
- Oliveira, M., Lavorato, M. e Romero, R.** (2011) Reconfiguração de sistemas de distribuição utilizando uma metaheurística GRASP. In: *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Ubatuba. Anais do XLIII SBPO.
- Santos, A.; Delbem, A.; London, J. e Bretas, N.** (2010). Node-depth encoding and multi-objective evolutionary algorithm applied to large-scale distribution system reconfiguration, *IEEE Transactions on Power Systems*, 25 (3), 1254-1265.
- Savier, J. S. e Das, D.** (2007), Impact of Network Reconfiguration on Loss Allocation of Radial Distribution Systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22, 2473-2480.
- Schmidt, H. P., Ida, N., Kagan, N. e Guaraldo, J. C.** (2005), Fast Reconfiguration of Distribution Systems Considering Loss Minimization, *IEEE Transactions on Power Systems*, 20, 1311-1319.
- Su, C., Chang, C. e Chiou, J.** (2005), Distribution network reconfiguration for loss reduction by ant colony search algorithm, *Electric Power Systems Research*, 75, 190-199.
- Teng, J.-H.** (2003), A direct approach for distribution system load flow solutions, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18, 882-887.

Wang, H., Murillo-Sánchez, C. E., Zimmerman, R. D. e Thomas, R. J. (2007), On Computational Issues of Market-Based Optimal Power Flow, *IEEE Transactions on Power Systems*, 22, 1185-1193.