

METODOLOGIAS PARA RESTABELECIMENTO DE ENERGIA COM PRIORIZAÇÃO DE CONSUMIDORES ESPECIAIS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE GRANDE PORTE

LEANDRO TOLOMEU MARQUES*, DOUGLAS HENRIQUE PEREIRA*, DANILO SIPOLI SANCHES†, ALEXANDRE C. B. DELBEM*, JOÃO B. A. LONDON JR.*

**Av. Trabalhador São-carlense, 400
Universidade de São Paulo
São Carlos, São Paulo, Brasil*

†*Av. Alberto Carazzai, 1640
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Cornélio Procópio, Paraná, Brasil*

Emails: leandrotolomeu@gmail.com, douglas.hpereira@hotmail.com, danilosanches@utfpr.edu.br, acbd@icmc.usp.br, jbalj@sc.usp.br

Abstract— Service restoration in contingency situations in electric power distribution systems involves several needs that make it a multi-objective and multi-constrained optimization problem. Among these needs highlights the supply prioritization of special consumers, for instance, hospitals, big industries, big supermarkets, etc. Thus, techniques for dealing with this problem should not disregard the presence of these consumers. Thereby, we propose in this work a mathematical modeling and two methods to solve the power restoration problem with special consumers prioritization in large distribution systems. In order to evaluate and compare the proposed methods, several tests were performed in the distribution system of the São Carlos city, in operation in 1994, which has 3860 buses and 631 switches.

Keywords— Power system optimization, large-scale distribution system, service restoration, special consumers prioritization, multiobjective evolutionary algorithm.

Resumo— O restabelecimento do fornecimento de energia elétrica em situações de contingência, em sistemas de distribuição de energia, envolve diversas necessidades que o tornam um problema de otimização multiobjetivo com múltiplas restrições. Dentre essas necessidades destaca-se a priorização de fornecimento aos consumidores especiais, como, por exemplo, hospitais, grandes indústrias, grandes supermercados, etc. Assim, técnicas para lidar com esse problema devem considerar a presença desses consumidores existentes nos sistemas de distribuição. Face ao exposto, propõe-se nesse trabalho uma modelagem matemática e duas metodologias para solucionar o problema de restabelecimento de energia com priorização de consumidores especiais em sistemas de distribuição de grande porte. Com o objetivo de avaliá-las e compará-las, diversos testes foram realizados utilizando o sistema de distribuição da cidade de São Carlos-SP, em operação no ano de 1994, que possui 3860 barras e 631 chaves.

Palavras-chave— Otimização em sistemas elétricos, sistema de distribuição de grande porte, restabelecimento de energia elétrica, priorização de consumidores especiais, algoritmo evolutivo multiobjetivo.

1 Introdução

Os Sistemas de Distribuição de energia elétrica (SDs) devem operar de forma contínua, confiável, econômica e em acordo com as restrições de carga e de operação. Entretanto, interrupções no fornecimento de energia são inevitáveis, em virtude principalmente da ocorrência de faltas permanentes. Nesse sentido, uma solução encontrada para melhorar a confiabilidade e a qualidade do fornecimento de energia elétrica, sem incorrer em gastos excessivos, foi o agrupamento de vários pontos de carga em blocos, chamados de setores, separados por chaves que operam no estado normalmente aberta (NA) ou normalmente fechada (NF). Assim sendo, é possível isolar trechos da rede e realizar a troca de cargas entre alimentadores e subestações após a ocorrência de faltas permanentes.

Quando ocorrem eventos que provocam a interrupção no fornecimento, as cargas atingidas são aquelas localizadas no setor sob falta e nos setores à jusante a este. Todavia, nem todas estas cargas precisam, necessariamente, permanecer sem energia elétrica durante o período de recuperação da

falha. Isto porque, devido a presença de chaves NA e NF, é possível restabelecer o fornecimento aos setores sãos com cargas desabastecidas e restringir a interrupção somente às cargas pertencentes ao setor sob inspeção ou sob falta.

Neste caso, chaves NFs devem ser operadas para isolar o setor da rede sob falta, e chaves NAs devem ser manobradas para restabelecer o fornecimento às cargas dos setores sãos por meio da sua reconexão a outros alimentadores próximos.

Entretanto, dependendo da quantidade de cargas transferidas para um novo alimentador, do nível de tensão desse alimentador, do seu carregamento e do carregamento da subestação na qual está conectado, é possível que as restrições operacionais e os critérios de qualidade da energia não sejam atendidos por essa nova configuração da rede. Assim sendo, serão necessárias manobras adicionais em chaves NFs e NAs para que seja implantada uma configuração da rede na qual todas as restrições sejam satisfeitas, i. e., uma solução factível. A determinação dessa configuração consiste no problema de restabelecimento de energia.

Ademais, existem nos SDs cargas elétricas que precisam ter prioridade de fornecimento nesse processo de restabelecimento. Em outras palavras, o fornecimento a essas cargas não deve ser interrompido, e, caso haja alguma atingida pela falta, esta deve ser restabelecida o quanto antes. Essas cargas prioritárias representam os consumidores especiais (CEs) atendidos pelo SD, tais como: hospitais, centros de transfusão de sangue, indústrias e supermercados de grande porte, etc.

Assim sendo, um plano adequado para restabelecimento de energia envolve as seguintes necessidades: minimização do número de consumidores fora de serviço (i. e., sem fornecimento) com priorização de CEs; minimização do número de operações de chaveamento; minimização do total de perdas por efeito Joule; ausência de sobrecarga na rede e nas subestações; manutenção dos níveis de tensão dentro dos intervalos exigidos pela legislação; manutenção da radialidade da rede¹. Dessa forma, o problema de restabelecimento de energia com priorização de CE é, por natureza, um problema de reconfiguração de redes. Reconfiguração de redes é o processo de mudança da topologia da rede por meio da alteração dos estados aberto/fechado das chaves seccionadoras.

Para lidar com o problema em questão, diversos trabalhos têm sido propostos na literatura, dentre os quais destacam-se aqueles baseados em técnicas meta-heurísticas, especialmente em algoritmos evolutivos (AEs), pelos resultados apresentados. Todavia, na maioria dessas metodologias, os CEs são tratados com a mesma prioridade das demais cargas (Mansour et al., 2009; Santos et al., 2010), de tal forma que são poucos os trabalhos disponíveis na literatura que priorizam o fornecimento de CEs no processo de restabelecimento de energia. Dentre estes uma limitação comum é quanto ao tamanho das redes para as quais foram desenvolvidos e testados: redes pequenas quando comparadas às redes reais (Miu et al., 1998; Miu et al., 2000; Kumar et al., 2008). Ademais, em outros casos, na tentativa de superar essa limitação, são feitas simplificações na representação da rede, deixando de considerar todos os elementos da mesma. Nestes casos, a solução fornecida pode não ter na rede em operação o mesmo efeito que teria na rede simplificada, o que compromete a confiabilidade dessas abordagens.

Face ao exposto, propõe-se neste trabalho duas metodologias para restabelecimento de energia com priorização de fornecimento a CEs em SDs de grande porte. Ao contrário de outras metodologias, estas não exigirão simplificações na representação da rede, considerando todas as variáveis envolvidas. Além disso, será apresentada uma comparação entre as metodologias propostas,

¹A fim de facilitar o ajuste do sistema de proteção e o gerenciamento da rede, os SDs operam normalmente de forma radial.

a fim de determinar qual tem melhor adequação ao problema em questão. Para tal, serão realizados testes num SD de grande porte com 3860 barras e 631 chaves. Será proposta também uma modelagem matemática para esse problema.

2 Modelagem matemática do problema

A fim de tratar computacionalmente o problema de restabelecimento de energia é apresentada em (Sanches, n.d.) uma formulação matemática para o problema. No entanto, nessa formulação não é considerada a presença de CEs. Desse modo, a fim de priorizar o atendimento aos CEs durante o processo de restabelecimento de energia em SDs de grande porte propõe-se a modelagem a seguir, desenvolvida com base naquela apresentada em (Sanches, n.d.).

$$\begin{aligned} \text{Min. } & \phi(G), \psi(G, G^o), \tau(G, G^o) \text{ e } \gamma(G) \\ \text{s. a : } & Ax = b \\ & X(G) \leq 1 \\ & B(G) \leq 1 \\ & V(G) \leq 1 \\ & G \text{ ser uma floresta,} \end{aligned} \quad (1)$$

em que G é uma floresta de grafo² representando uma configuração do SD; $\phi(G)$ é o número de consumidores fora de serviço em uma configuração G ; $\psi(G, G^o)$ é o número de operações de chaveamento necessárias para se obter uma configuração G a partir de uma configuração G^o após a isolamento da falta e reconexão dos setores são sem fornecimento; $\tau(G, G^o)$ é o número de CEs transferidos para obtenção de uma configuração G a partir de uma configuração G^o após a isolamento da falta e reconexão dos setores são sem fornecimento; $\gamma(G)$ são as perdas resistivas, em p.u., na configuração G ; A é a matriz incidência de G ; x é o vetor de correntes de linha na configuração G ; b é um vetor contendo as correntes complexas nas barras de carga ($b_i \leq 0$) ou as injeções de corrente nas barras das subestações ($b_i > 0$); $X(G)$ é o maior valor de carregamento da rede na configuração G , dado pela maior razão x_j/\bar{x}_j , onde, \bar{x}_j é um limitante superior de corrente para cada corrente x_j em uma linha j ; $B(G)$ é o maior valor de carregamento de subestação na configuração G , dado pela maior razão b_s/\bar{b}_s , onde \bar{b}_s é um limitante superior para cada injeção de corrente b_s provida por uma subestação s ; $V(G)$ é o maior valor de queda de tensão em uma configuração G , dado pelo maior valor de $|v_s - v_k|/\delta$, onde v_k é a magnitude de tensão, em p.u., na barra k e v_s é a magnitude de tensão, em p.u., na barra da subestação s que alimenta a barra k , e δ é a máxima queda de tensão admissível, nesse trabalho 10%, i. e., $\delta = 0,1$.

A formulação do problema apresentada na Equação 1 pode ser sintetizada considerando:

²No problema de restabelecimento de energia via reconfiguração de redes um SD pode ser convenientemente modelado por meio de uma floresta de grafo (Delbem et al., 2004)

- i. penalizações para soluções que violarem as restrições $X(G)$, $B(G)$ e $V(G)$;
- ii. uso da Representação Nó-Profundidade (RNP) (Santos et al., 2010; Mansour et al., 2009), que é uma estrutura de dados abstrata que pode armazenar e manipular com eficiência florestas geradoras (configurações de rede) e garantir que todas as modificações produzirão também uma floresta geradora, neste caso, uma nova configuração radial capaz de fornecer energia para todo o SD³.
- iii. resolver $Ax = b$ utilizando algoritmo de fluxo de potência de varredura direta/inversa com RNP, que organiza naturalmente todos os nós segundo uma relação conhecida como “Modelo Pai-Filho” em cada configuração G , ou seja, sem a necessidade de execução de um algoritmo para fazer essa ordenação;
- iv. $\phi(G) = 0$, uma vez que a RNP sempre gera florestas que correspondem a redes sem consumidores fora de serviço após a reconexão de cargas localizadas à jusante da falta.

Assim, o problema pode ser reformulado e escrito conforme adiante:

$$\text{Min. } \psi(G, G^\circ), \tau(G, G^\circ), \gamma(G) \text{ e } w_x X(G) + w_b B(G) + w_v V(G)$$

s. a.: Fluxo de carga com RNP,
 G ser uma floresta gerada pela RNP,

em que w_x , w_s e w_v são pesos definidos em função do valor das restrições operacionais, da seguinte forma:

$$w_x = \begin{cases} A, & \text{se } X(G) > 1 \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$$

$$w_b = \begin{cases} B, & \text{se } B(G) > 1 \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$$

$$w_v = \begin{cases} C, & \text{se } V(G) > 1 \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases}$$

o qual A , B e C são valores maiores que zero.

3 Representação Nó-Profundidade

Um grafo G é um par $(N(G), E(G))$, onde $N(G)$ é um conjunto finito de elementos denominados nós e $E(G)$ é um conjunto finito de elementos denominados arestas. Um SD pode ser representado por grafos, onde os nós representam os setores e as arestas interligando as barras representam as chaves seccionadoras.

A RNP (Delbem et al., 2004) é uma representação de árvore de grafos baseada nos conceitos de nó e profundidade de um nó em uma árvore

³O termo “todo o SD” significa todas as partes conectáveis de um SD. Em algumas situações não é possível conectar uma área fora de serviço em razão da falta de chaves.

de grafo, e consiste basicamente de uma lista contendo os nós da árvore e suas respectivas profundidades, formando pares do tipo $(nx; px)$, onde nx é o nó da árvore e px a profundidade do nó.

A ordem em que os pares são dispostos na lista é importante. Uma busca em profundidade em uma árvore de grafo pode produzir uma ordenação adequada inserindo um par $(nx; dx)$ na lista quando o nó n_x é visitado pela busca. Este processamento pode ser executado *off-line*. A Fig. 1. representa um grafo, onde as linhas espessas indicam a árvore geradora do grafo. Na mesma Fig. 1. está representada também a correspondente RNP desta árvore geradora, assumindo o nó 1 como raiz. Várias RNPs possibilitam a representação de uma floresta, i. e., um SD.

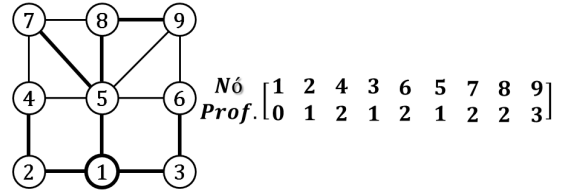


Figura 1: Árvore geradora de grafo e sua RNP.

Para facilitar a manipulação da floresta armazenada em RNPs, com baixo tempo de processamento computacional, foram criados dois operadores. Tais operadores realizam poda ou enxerto nas árvores da floresta de forma a gerar modificações na floresta. Mais informações sobre a RNP e seus operadores, aplicados em problemas de reconfiguração de redes, de uma forma geral, podem ser encontradas em (Santos et al., 2010).

4 Metodologias Propostas

4.1 Metodologia Base: Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo em Tabelas

Com o objetivo de solucionar o problema de restabelecimento de energia com priorização de CEs em SDs de grande porte, foi utilizada como base a metodologia proposta por (Santos et al., 2010), denominada Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo em Tabela (AEMT). Esta metodologia faz uso da RNP para representar computacionalmente os SDs sem simplificações e foi desenvolvida para solucionar os problemas de redução de perdas resistivas e de restabelecimento de energia em SDs de grande porte via reconfiguração de redes.

O AEMT possui tabelas que armazenam os melhores indivíduos (configurações da rede) para: carregamento da rede, carregamento da subestação, queda de tensão, perdas resistivas, função agregação e número de operações de manobra. A função agregação é uma equação que reuni as restrições operacionais, as perdas resistivas e o número de manobras para cada configuração G gerada pelo AEMT, conforme apresentado na Equação 3, cujos termos encontram-se todos definidos na Seção 2.

$$f(G) = \gamma(G) + \psi(G, G^\circ) + w_{11}X(G) + w_{22}B(G) + w_{33}V(G) \quad (3)$$

Após a isolamento do setor em falta e a reconexão das cargas fora de serviço, a geração de novos indivíduos no AEMT é feita pela aplicação dos operadores da RNP. A seleção e reprodução ocorrem de acordo com os seguintes passos: (i) escolha randômica de uma tabela de subpopulação P^* ; (ii) escolha randômica de um indivíduo G° dentro da tabela P^* ; (iii) aplicação de um dos operadores da RNP para gerar um novo indivíduo G a partir do indivíduo G° . Em seguida esse indivíduo G é avaliado por meio de um fluxo de potência de varredura direta/inversa, com RNP, do tipo soma de corrente. O indivíduo G será então inserido em uma tabela de subpopulação se esta não estiver cheia ou se G for melhor que o pior indivíduo presente na tabela, substituindo-o. Esse procedimento é realizado até que seja atingido o número máximo de soluções geradas (G_{max}), sendo este um parâmetro requerido pelo AEMT. Além de G_{max} o AEMT requer também a definição dos seguintes parâmetros: S_{P_i} , i. e., o número de indivíduos que podem ser armazenadas em uma tabela P_i ; os pesos w_x , w_s e w_v , penalizando as restrições operacionais na função agregação.

As tabelas presentes no AEMT e as soluções que armazenam são as seguintes: (i) P_1 – soluções com os menores valores de função agregação; (ii) P_2 – soluções com os menores valores de perdas resistivas; (iii) P_3 – soluções com os menores valores de carregamento da rede; (iv) P_4 – soluções com os menores valores de carregamento de subestação; (v) P_5 – soluções com os menores valores de queda máxima de tensão; (vi) P_{5+i} – soluções com os menores valores de perdas resistivas e com i pares de manobras após a isolamento da falta e reconexão das cargas sãs sem fornecimento, sendo $i = 1, \dots, 5$.

Apesar da sua capacidade em tratar do problema de restabelecimento de energia em SDs de grande porte, essa metodologia não considera a presença dos CEs. Assim sendo, foram desenvolvidas duas metodologias para restabelecimento de energia com priorização de CEs em SDs de grande porte, tendo como base o AEMT. Essas metodologias estão apresentadas na sequência.

4.2 Metodologia Proposta 1

Considerando-se que as interrupções no fornecimento de energia aos CEs devem ser minimizadas, tanto em número de ocorrências quanto em duração, esta metodologia foi desenvolvida a fim de tornar nulo o número de desligamentos desses consumidores durante a execução dos planos de restabelecimento. Para tal, a Metodologia 1 proposta impede a transferência de setores com CEs que não tenham sido atingidos pela falta, e restringe o remanejamento de cargas especiais somente àquelas que ficaram fora de serviço após a ocorrência da falta. Estas ficam livres para serem remanejadas pois, uma vez que um consumidor foi

desligado, este precisa ser reconectado, independentemente dele ser especial ou não. Em outras palavras, os CEs que permaneceram ligados após a ocorrência da falta não serão remanejados de um alimentador para outro, independentemente desta manobra ser ou não útil para a redução das quedas de tensão, do carregamento da rede ou da subestação.

Para ilustrar esse comportamento da Metodologia 1 proposta considere a Fig. 2, que representa um alimentador não afetado por falta em um SD, bem como a presença de um CE no setor 7. A fim de evitar a transferência desse consumidor, e por consequência uma interrupção momentânea em seu fornecimento, o caminho entre o nó 7 e a raiz da árvore de grafo (nó 1 que representa uma subestação) é determinado, e todos os nós presentes nesse caminho, em destaque, ficam proibidos de serem escolhidos como nó de poda no processo de transferência de subárvores pelos operadores da RNP. Ao fazer isso para todos os setores com CE, o algoritmo buscará somente por soluções que não exijam a transferência de CEs e assim a interrupção momentânea do fornecimento a essas cargas.

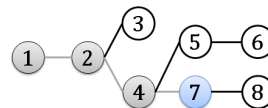


Figura 2: Comportamento da Metodologia 1.

Apesar de garantir que o número de desligamento de CEs não afetados pela falta seja nula, é importante destacar que a Metodologia 1 proposta restringe o espaço de busca do AEMT, ao passo que reduz o número de configurações possíveis para a rede. Como consequência é possível que a dificuldade do algoritmo em obter soluções factíveis seja maior.

4.3 Metodologia Proposta 2

A fim de obter uma metodologia para restabelecimento de energia com priorização de CEs sem a dificuldade apresentada pela Metodologia 1, foi desenvolvida uma segunda metodologia, diferente da primeira e aqui denominada Metodologia 2.

Essa metodologia visa permitir ao AE percorrer, durante o processo de busca, regiões do espaço de busca que contenham soluções com CEs transferidos, porém com melhores valores para as restrições operacionais, e assim chegar a soluções melhores que a Metodologia 1.

Desse modo, a Metodologia 2 foi obtida pela inserção de duas novas tabelas de subpopulações no AEMT, apresentado na Seção 4.1, que armazenam as seguintes soluções:

- P_{11} – soluções com os menores valores de número de operações de manobra e com zero CEs transferidos após a isolamento da falta e reconexão das cargas sãs fora de serviço;
- P_{12} – soluções com os menores valores de CEs transferidos após a isolamento da falta e reconexão das cargas sãs fora de serviço.

Desse modo, espera-se que a Metodologia 2 seja capaz de percorrer com mais facilidade o espaço de busca e garantir soluções factíveis com o mínimo de CEs transferidos, de preferência zero, como os indivíduos presentes na tabela P_{11} .

5 Testes e Resultados

Com o objetivo de avaliar e comparar as duas metodologias propostas, diversos testes foram realizados no SD da cidade de São Carlos-SP, em operação no ano de 1994, que possui: 3860 barras, 532 setores, 631 chaves (509 NF e 122 NA), 23 alimentadores e 3 subestações. Os testes visam avaliar e comparar as duas metodologias em relação a dois aspectos: (i) capacidade de fornecer soluções factíveis para diferentes quantidades de CEs e (ii) capacidade de minimizar as quedas de tensão, o carregamento da rede, o carregamento de subestações e as perdas resistivas, para diversos valores de CEs.

Assim, considerou-se a ocorrência de uma falta permanente no setor 504, responsável por colocar fora de serviço um alimentador inteiro, e a definição de setores com CE de forma inteiramente aleatória, sendo 1 CE por setor. Os parâmetros de entrada utilizados para simular ambas as metodologias foram: $G_{max} = 15.000$, $S_{P_i} = 5$ (para todas as tabelas) e $A = 100$, $B = 100$ e $C = 1000$.

Foram realizadas 50 simulações para cada porcentagem de setores com CE, totalizando 500 simulações com a Metodologia 1 e 550 com a Metodologia 2⁴, cujos resultados são apresentados nas Figs. 3, 4, 5, 6 e 7. A fim de facilitar a análise do desempenho de ambas as metodologias em função da quantidade de CEs, e ainda mostrar a evolução do AEMT, nas Figs. 3, 4, 5 e 6 é ilustrado também, respectivamente, o valor da queda de tensão, carregamento da rede, carregamento de subestação e de perdas resistivas totais para uma configuração inicial, ou seja, uma configuração obtida pelo algoritmo após a isolamento da falta e a reconexão dos setores são sem fornecimento e antes do início do processo de evolução das subpopulações.

Analisando as Figs. 3, 4, 5 e 6 pode-se observar que a capacidade da Metodologia 2 em minimizar as restrições operacionais e as perdas resistivas totais é praticamente independente da quantidade de CEs, uma vez que os valores mínimos encontrados são bem próximos para qualquer quantidade de CEs. Enquanto isso, na Metodologia 1 essa capacidade é inversamente proporcional ao número de CEs presentes no SD, de tal forma que, quanto maior a quantidade de CEs, maior é a dificuldade encontrada por essa metodologia para minimizar essas variáveis do problema. Sendo que, para valores percentuais elevados de CE o menor valor obtido para queda de tensão, carregamento da rede,

⁴O número de execuções da Metodologia 1 foi menor porque esta não foi executada para 100% de setores com CEs, uma vez que, nesse caso não seria possível transferir nenhum setor.

de subestação e perdas resistivas totais tende a ser maior que esses parâmetros possuíam antes do início do processo evolutivo, na configuração inicial.

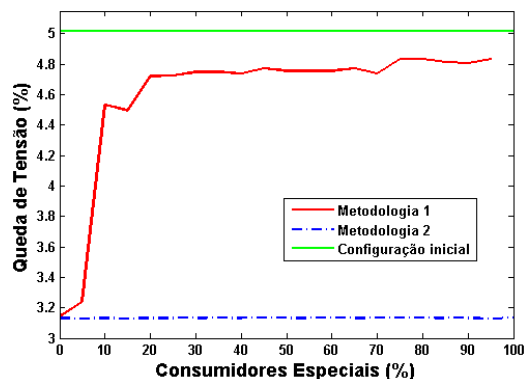


Figura 3: Valor médio das menores quedas de tensão encontradas com cada metodologia em 50 simulações para diferentes porcentagens de CEs.

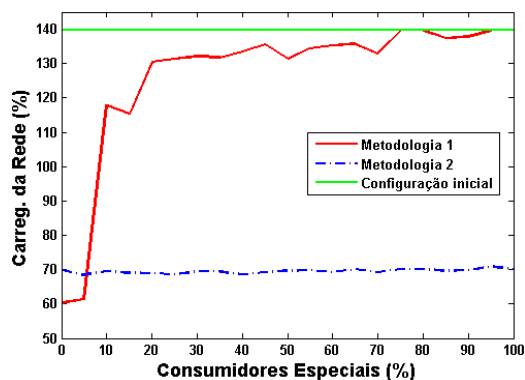


Figura 4: Valor médio dos menores carregamentos da rede encontrados com cada metodologia em 50 simulações para diferentes porcentagens de CEs.

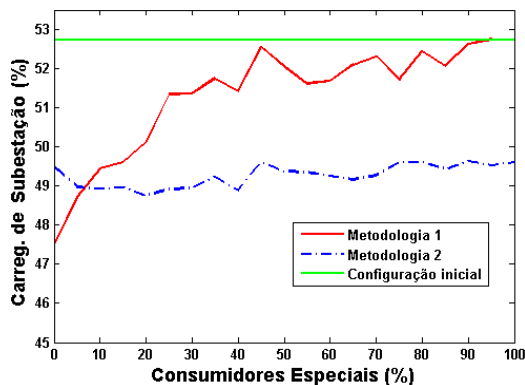


Figura 5: Valor médio dos menores carregamentos de subestação obtidos por cada metodologia em 50 simulações para diferentes porcentagens de CEs.

Tendo em vista que a quantidade de CEs existentes em SDs reais é pequena, pode-se concluir que, de uma forma geral, ambas as metodologias podem ser viáveis, mas em situações distintas. Por exemplo, em situações mais críticas, como no caso de SDs que operam próximo da sua capacidade máxima, é possível que essa Metodologia 2 seja mais viável que a 1, já que esta última, com base nas limitações apresentadas, pode ser incapaz de determinar soluções factíveis, uma vez que sua capacidade de busca é altamente influenciada pelos

parâmetros do problema, como pôde ser visto em relação a quantidade de CEs. Por outro lado, a Metodologia 2 pode ter a desvantagem de exigir a transferência de CEs, o que, em algumas situações, não é possível de ser executado.

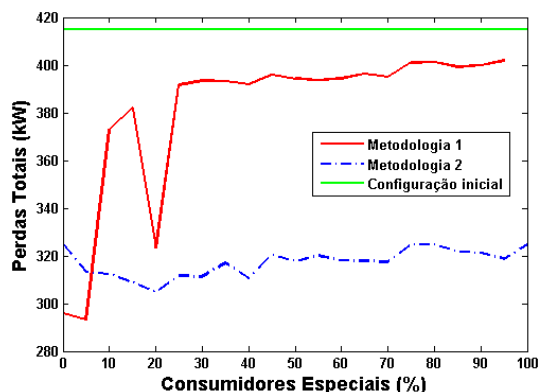


Figura 6: Valor médio das menores perdas resistivas totais encontradas com cada metodologia em 50 simulação para diferentes porcentagens de CEs.

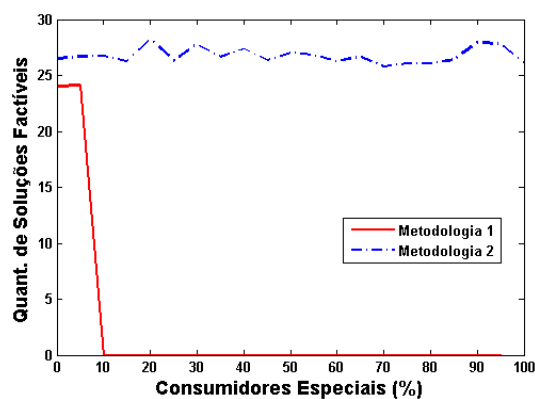


Figura 7: Número médio de soluções factíveis encontradas por cada metodologia em função da porcentagem de CEs.

Em relação a capacidade de ambas as metodologias em fornecer soluções factíveis pode-se observar nas Figs. 4 e 7 que, para porcentagens de CEs maiores do que 10% (equivalente à aproximadamente 53 CEs, neste caso) a Metodologia 1 não foi capaz de obter soluções sem incorrer em sobrecarga na rede. Enquanto isso a Metodologia 2 conseguiu determinar soluções factíveis praticamente sem sofrer influência da quantidade de CEs. Porém, exigiu a transferência de CEs não atingidos pela falta. Por exemplo, para 5%, 50% e 100% de setores com CEs (i. e., 26, 266 e 532 CEs), a Metodologia 2 exigiu, em média, aproximadamente 8, 45 e 83 transferências de CEs, respectivamente.

6 Conclusões

O presente trabalho apresentou uma modelagem matemática e duas metodologias para solucionar o problema de restabelecimento de energia com priorização de CEs em SDs de grande porte. Ambas foram desenvolvidas tendo como base o AEMT, i. e., uma metodologia para restabelecimento de energia em SDs reais que não exige simplificações na codificação da rede, garantindo essa caracterís-

tica também às metodologias propostas. Para tal foi utilizada a RNP para representar o SD. A fim de avaliar e comparar as Metodologias 1 e 2 testes foram realizados no SD da cidade São Carlos - SP, configuração em operação em 1994, que possui 3860 barras e 631 chaves. De acordo com os resultados obtidos, concluiu-se que ambas as metodologias são aptas para lidar com o problema em questão. Todavia, a Metodologia 2 foi capaz de fazê-lo para qualquer quantidade de CEs, ao preço de ter-se que transferir, em algumas situações, alguns CEs. Ao contrário, a Metodologia 1 não exigiu a interrupção de fornecimento a nenhum CE, mas demonstrou que o seu desempenho é dependente do número de CEs presente na rede.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à FAPESP pelo apoio financeiro concedido a essa pesquisa.

Referências

- Delbem, A. C. B., de Carvalho, A. C., Policastro, C. A., Pinto, A. K. O., Honda, K. and Garcia, A. C. (2004). Node-depth encoding for evolutionary algorithms applied to network design, *GECCO*, pp. 678–687.
- Kumar, Y., Das, B. and Sharma, J. (2008). Multi-objective, multiconstraint service restoration of electric power distribution system with priority customers, *IEEE TPD* **23**(1): 261–270.
- Mansour, M. R., Santos, A. C., London Jr., J. B. A., Delbem, A. C. B. and Bretas, N. G. (2009). Energy restoration in distribution systems using multi-objective evolutionary algorithm and an efficient data structure, *IEEE Power Tech*, pp. 1–7.
- Miu, K. N., Chiang, H. D. and McNulty, R. J. (2000). Multi-tier service restoration through network reconfiguration and capacitor control for large-scale radial distribution networks, *IEEE TPS* **15**(3): 1001–1007.
- Miu, K. N., Chiang, H. D., Yuan, B. and Darling, G. (1998). Fast service restoration for large-scale distribution systems with priority customers and constraints, *IEEE TPS* **13**(3): 789–795.
- Sanches, D. S. (n.d.). Algoritmos evolutivos multi-objetivo para reconfiguração de redes em sistemas de distribuição de energia elétrica, Tese de doutorado em Engenharia Elétrica–EESC/USP.
- Santos, A. C., Delbem, A. C. B., London Jr., J. B. A. and Bretas, N. G. (2010). Node-depth encoding and multiobjective evolutionary algorithm applied to large-scale distribution system reconfiguration, *IEEE TPS* **25**(3): 1254–1265.