

ALOCAÇÃO DE CHAVES EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA VIA ALGORITMOS GENÉTICOS BASEADOS EM SISTEMAS ESPECIALISTAS FUZZY

TIAGO ALENCAR, ANSELMO B. RODRIGUES, MARIA G. DA SILVA

Laboratório de Sistemas de Potência, Departamento de Engenharia Elétrica, UFMA

Av. dos Portugueses, S/N, CEP 65080-040, São Luís, MA

E-mails: tiagoalen@gmail.com, schaum.nyquist@gmail.com, guia@dee.ufma.br

Abstract—The electric utilities must satisfy two competitive goals during the planning process: to reduce investments costs and ensure that the reliability goals are achieved. An alternative way to carry out these objectives is the optimal allocation of sectionalizing switches in the power electric distribution network. These switches are efficient in decreasing the interruption time of the electrical energy supply for the customers. This paper proposes an optimization technique based on genetic algorithms to solve the problem of optimal allocation of sectionalizing switches in electric distribution networks. This Genetic Algorithm is combined with fuzzy expert system to include engineering judgment in the solution of the switch allocation problem. The proposed model was tested in a large scale substation in the Northwest of Brazil. The results obtained showed a considerable improvement in the system's reliability indices with a low investment cost.

Keywords—Distribution Network, Optimization, Switch Allocation, Genetic Algorithms, Specialist Fuzzy Systems, Reliability.

Resumo—As empresas de distribuição de energia elétrica devem satisfazer dois objetivos concorrentes durante o processo de planejamento: minimizar os custos de investimento e assegurar que as metas de continuidade sejam alcançadas. Uma alternativa para obter estes objetivos é a alocação ótima de dispositivos de chaveamento na rede de distribuição. Estas chaves são eficientes na redução do tempo de interrupção do fornecimento de energia elétrica. Este artigo propõe uma técnica de otimização baseada em Algoritmos Genéticos (AG) para resolver o problema de alocação de chaves em redes de distribuição. Este AG é combinado com um Sistema Especialista Fuzzy (SEF) para incluir experiência de engenheiros na solução do problema de alocação de chaves. O modelo proposto foi aplicado em uma subestação de grande porte da região Nordeste do Brasil. Os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo de alocação ótima mostram uma melhora considerável nos índices de confiabilidade da rede com um baixo custo de investimento.

Palavras-chave—Redes de Distribuição, Otimização, Alocação de Chaves, Algoritmos Genéticos, Sistemas Especialistas Fuzzy, Confiabilidade.

1 Introdução

A rede de distribuição é a parte do sistema de energia elétrica na qual ocorre o maior número de falhas. Estima-se que 90% de todas as falhas que ocorrem no sistema elétrico de potência acontecem na rede de distribuição (Brown, 2009). Portanto, é importante considerar aspectos de confiabilidade no planejamento de redes de distribuição.

Uma das formas de melhorar significativamente a confiabilidade da rede é através da alocação de chaves seccionadoras. As chaves minimizam os tempos de interrupção isolando a região da rede a montante da falta. Estas chaves também são utilizadas para realizar transferências de carga a jusante da falta para alimentadores adjacentes, durante a restauração. Desta forma, uma alocação criteriosa das chaves pode resultar em ganhos expressivos na confiabilidade do sistema.

A alocação de chaves é um problema de otimização combinatória discreta. Sendo n o número de locais onde podem ser instaladas chaves no sistema, o número total de configurações para o posicionamento das chaves na rede é 2^n . Problemas dessa natureza são difíceis de resolver utilizando técnicas de programação matemática convencionais, tal como a programação inteira. Esta restrição é devido ao fato de que não é possível expressar analiticamente os índices de confiabilidade em função das posições de instalação das chaves. Desta forma, as técnicas mais adequadas para resolver o problema de alocação de

chaves são os algoritmos baseados em meta-heurísticas (Billinton & Jonnavithula 1996; Brown et al. 1996; Wenyu et al. 2004; Teng & Liu 2002; Tsao et al. 2005).

Billinton & Jonnavithula (1996), Brown et al. (1996) e Wenyu et al. (2004) usam AG e Simulated Annealing (AS) para resolver o problema de alocação ótima de chaves. Nestes artigos a função objetivo otimizada é composta pelos custos associados com: manutenção, instalação e interrupção. Contudo, o AG tem mais chances de fornecer uma solução ótima global do que o SA. Esta vantagem do AG é devido ao fato de que o SA se baseia em técnicas de busca local.

Recentemente, novos algoritmos usando meta-heurísticas têm sido aplicados na solução do problema de alocação ótima de chaves, por exemplo: Colônias de Formigas (Teng & Liu, 2002) e Evolução Diferencial (Tsao et al., 2005). Estes novos algoritmos são usados para minimizar custos de: interrupção, investimento e manutenção.

É importante enfatizar que nenhuma das referências citadas acima considera a infactibilidade das soluções associadas com o número máximo de chaves que podem ser instaladas. Isto é, os métodos propostos não levam em conta restrições orçamentárias em termos de investimento para a concessionária. Além disso, não são consideradas aplicações das metodologias propostas em redes de distribuição de grande porte.

Brown (2000) avalia o impacto do uso de um SEF para a obtenção da população inicial do AG. Este AG é usado para minimizar os custos de interrupção e instalação dos equipamentos. Estes custos são minimizados considerando as seguintes variáveis de decisão: a automação e a instalação de dispositivos de proteção e seccionamento. A aplicação do SE na inicialização do AG resultou em melhorias significativas no desempenho do AG com relação à inicialização aleatória.

O principal objetivo deste artigo é utilizar o AG combinado com um SEF para resolver o problema de alocação ótima de chaves em redes de distribuição. O método proposto neste artigo apresenta as seguintes contribuições com relação ao trabalho de Brown (2000): i) o comprimento das seções dos alimentadores foi incluído como variável de entrada no SEF para melhorar o desempenho do AG; ii) o SEF é usado para corrigir soluções infactíveis geradas pelos operadores de mutação e *crossover* do AG. O método proposto foi testado em uma subestação de grande porte pertencente à Companhia Energética do Maranhão (CEMAR). Os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo de alocação ótima mostram uma melhora considerável nos índices de confiabilidade da rede com um baixo custo de investimento.

2 Análise de Confiabilidade em Redes de Distribuição

Neste artigo, os índices de confiabilidade são calculados usando o Método Analítico de Enumeração de Estados (MAEE). O MAEE avalia o impacto de uma contingência no sistema com base na duração e na frequência da contingência, para obter os índices de confiabilidade (Brown, 2009). Esta avaliação é realizada considerando os seguintes aspectos associados com a operação de redes de distribuição: resposta do sistema de proteção, isolamento da falta e restauração via transferências de carga para alimentadores adjacentes.

Os principais índices de confiabilidade estimados pelo MAEE são:

- Valor Esperado da Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora (FIC):

$$\tilde{E}[FIC_i] = \sum_{j \in F_i}^n \lambda_j [\text{falhas/ano}] \quad (1)$$

- Valor Esperado da Duração de Interrupção por Unidade Consumidora (DIC):

$$\tilde{E}[DIC_i] = \sum_{j \in F_i}^n \lambda_j t_{ij} [\text{horas/ano}] \quad (2)$$

- Tempo médio de restauração (r_i):

$$r_i = \frac{\tilde{E}[DIC_i]}{\tilde{E}[FIC_i]} [\text{horas}] \quad (3)$$

onde:

$\tilde{E}[FIC_i]$ é o valor esperado do FIC para o ponto de carga i ;

$\tilde{E}[DIC_i]$ é o valor esperado do DIC para o ponto de carga i ;

λ_j é a taxa de falha da contingência j ;

F_i é o conjunto de contingências que causam interrupção no ponto de carga i ;

t_{ij} é o tempo da restauração do ponto de carga i devido à contingência j ;

Além dos índices para os pontos de carga, o MAEE pode ser usado para estimar os seguintes índices do sistema:

- Valor Esperado da Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC):

$$\tilde{E}[FEC] = \frac{\sum_{i=1}^{Nlp} \tilde{E}[FIC_i] N_i}{\sum_{i=1}^{Nlp} N_i} [\text{falhas/ano}] \quad (4)$$

- Valor Esperado da Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC):

$$\tilde{E}[DEC] = \frac{\sum_{i=1}^{Nlp} \tilde{E}[DIC_i] N_i}{\sum_{i=1}^{Nlp} N_i} [\text{horas/ano}] \quad (5)$$

onde:

$\tilde{E}[FEC]$ é o valor esperado do FEC;

$\tilde{E}[DEC]$ é o valor esperado do DEC;

Nlp é o número total de pontos de carga do sistema;

N_i é o número de consumidores conectados ao ponto de carga i .

3 Sistema Especialista Fuzzy Usado na Alocação de Chaves

Os Sistemas Especialistas foram desenvolvidos para realizar tarefas próprias de especialistas humanos, dentro de um domínio de conhecimento específico (El-Hawary 1998; Lambert-Torres 2008; Pacheco & Vellasco 2007). Neste artigo um SEF é usado para fornecer uma informação sobre o potencial de um ramo para a instalação de uma chave do lado do seu nó inicial. O sistema especialista usado para realizar esta tarefa utiliza as seguintes variáveis de entrada:

i) Número de Irmãos (NI): é uma medida da ramificação que está ocorrendo no início da seção considerada. Por exemplo, se o número máximo de ramos partindo de um nó no sistema em estudo é 3, um valor normalizado é obtido dividindo por dois o número de outras seções que partem do nó inicial (nó a montante) da seção considerada.

ii) Carga à jusante (CJ): esta entrada mede a quantidade de carga que está conectada à jusante da seção considerada. Um valor normalizado é obtido dividindo a carga à jusante da seção (incluindo a carga da seção) pela carga total do alimentador.

iii) Comprimento (CN): é o comprimento normalizado de uma seção, isto é, o comprimento de uma seção dividido pelo comprimento da maior seção do sistema.

No processo de fuzzyficação foram utilizadas três funções de pertinência triangulares para a representação dos conceitos das variáveis de entrada. A escolha da forma da função de pertinência não é uma característica primordial para o sistema, visto que este não é tão sensível a essa escolha (Mendel, 1995). O número de conceitos escolhidos para utilização teve por finalidade a formação de uma base de conhecimento consistente a respeito do problema. Estas funções de pertinência são mostradas na Figura 1.

O processo de inferência é então realizado avaliando as variáveis de entrada com relação ao conjunto de regras que formam a base de conhecimento. O método de inferência selecionado foi o Min-Max, por ser um método muito utilizado e por representar de forma coerente a saída fuzzy do problema estudado (Gomide et al. 1995).

O resultado do processo de inferência é uma variável fuzzy. O valor de saída do sistema especialista avalia o benefício de instalação da chave (B) em uma determinada seção da rede. Foram utilizados quatro conceitos na representação fuzzy da variável de saída, como finalidade a obtenção precisão adequada para saída do sistema (Mendel, 1995). As funções de pertinência utilizadas na variável de saída são mostradas na Figura 2. Adicionalmente, a Tabela 1 mostra as saídas do SEF para a base de conhecimento.

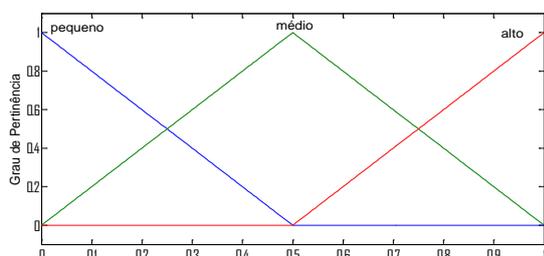


Figura 1. Funções de Pertinência para as variáveis de entrada.

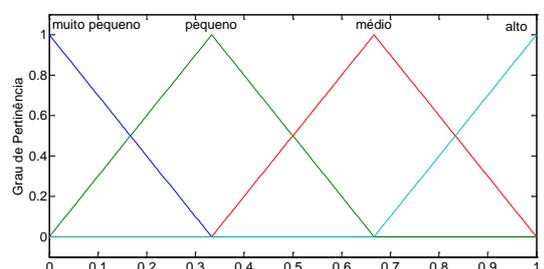


Figura 2. Funções de pertinência para a variável de saída.

O processo de desfuzzyficação é então utilizado para a obtenção do valor numérico que represente a saída fuzzy. Não há uma forma sistemática para determinação do método de desfuzzyficação mais apropriado (Gomide et al. 1995). Neste artigo foi utilizado o método do centróide no processo de desfuzzyficação do SEF usado na alocação de chaves. A saída do processo de desfuzzyficação é um valor no intervalo [0,1]. Esse valor expressa o benefício de instalação da chave seccionadora em

uma determinada seção da rede de distribuição. A partir dessa análise, é então formado um vetor que guarda o benefício de instalação da chave para cada seção da rede de distribuição.

Tabela 1. Base de Conhecimento usada pelo SEF, onde: P é pequeno, MP é muito pequeno, M é médio, A é alto e B é a saída.

Rule #1	If (NI is P) and (CJ is P) and (CN is P)	then B is MP
Rule #2	If (NI is P) and (CJ is P) and (CN is M)	then B is MP
Rule #3	If (NI is P) and (CJ is P) and (CN is A)	then B is MP
Rule #4	If (NI is P) and (CJ is M) and (CN is P)	then B is MP
Rule #5	If (NI is P) and (CJ is M) and (CN is M)	then B is MP
Rule #6	If (NI is P) and (CJ is M) and (CN is A)	then B is P
Rule #7	If (NI is P) and (CJ is A) and (CN is P)	then B is MP
Rule #8	If (NI is P) and (CJ is A) and (CN is M)	then B is MP
Rule #9	If (NI is P) and (CJ is A) and (CN is A)	then B is M
Rule #10	If (NI is M) and (CJ is P) and (CN is P)	then B is MP
Rule #11	If (NI is M) and (CJ is P) and (CN is M)	then B is MP
Rule #12	If (NI is M) and (CJ is P) and (CN is A)	then B is P
Rule #13	If (NI is M) and (CJ is M) and (CN is P)	then B is P
Rule #14	If (NI is M) and (CJ is M) and (CN is M)	then B is P
Rule #15	If (NI is M) and (CJ is M) and (CN is A)	then B is M
Rule #16	If (NI is M) and (CJ is A) and (CN is P)	then B is P
Rule #17	If (NI is M) and (CJ is A) and (CN is M)	then B is P
Rule #18	If (NI is M) and (CJ is A) and (CN is A)	then B is M
Rule #19	If (NI is A) and (CJ is P) and (CN is P)	then B is MP
Rule #20	If (NI is A) and (CJ is P) and (CN is M)	then B is MP
Rule #21	If (NI is A) and (CJ is P) and (CN is A)	then B is P
Rule #22	If (NI is A) and (CJ is M) and (CN is P)	then B is P
Rule #23	If (NI is A) and (CJ is M) and (CN is M)	then B is P
Rule #24	If (NI is A) and (CJ is M) and (CN is A)	then B is M
Rule #25	If (NI is A) and (CJ is A) and (CN is P)	then B is M
Rule #26	If (NI is A) and (CJ is A) and (CN is M)	then B is A
Rule #27	If (NI is A) and (CJ is A) and (CN is A)	then B is A

4 Formulação do Problema

O problema de alocação de chaves em redes de distribuição é resolvido determinando o número e as posições das chaves a serem instaladas no sistema, com o objetivo de obter a melhor configuração em termos de confiabilidade e custo. Neste artigo, considera-se como ponto candidato para a alocação de chave o início de cada seção do alimentador principal. Essa consideração leva em conta o fato de que a instalação de uma chave no início e no final de uma seção não traz ganhos consideráveis de confiabilidade da rede comparados com os custos envolvidos. Utilizando essa aproximação também se diminui o espaço solução, reduzindo pela metade o número de locais candidatos para a instalação de chaves na rede. Assim se obtém um ganho considerável no desempenho do algoritmo.

A formulação matemática proposta para o problema de alocação de chaves é mostrada abaixo:

$$\text{Minimizar } \tilde{E}[DEC(x)] \quad (6)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n x_i \leq n^{\max} \quad (7)$$

onde n^{\max} é o número máximo de chaves que podem ser instaladas e x é um vetor com dimensão igual ao número de posições candidatas (n) para a instalação

de chaves. Desta forma, $x_i = 1$, se uma chave é instalada na posição i e $x_i = 0$, caso contrário.

A equação (7) representa de forma indireta restrições de orçamento associadas com os custos de instalação das chaves. O objetivo do algoritmo é então encontrar um posicionamento das chaves na rede de forma a garantir melhorias na continuidade do fornecimento da energia elétrica aos consumidores.

5 Algoritmo Genético usado na Solução do Problema de Alocação de Chaves

Neste artigo, o problema de alocação de chaves em redes de distribuição foi resolvido utilizando AG. Esse método foi usado devido às seguintes vantagens: i) capacidade de realizar buscas em paralelo no espaço solução; ii) facilidade de integração com sistemas especialistas e iii) flexibilidade para incluir restrições (Alves da Silva & Falcão 2008; Pacheco & Velasco 2007).

O primeiro passo na aplicação do algoritmo genético é a definição de como a solução será representada (codificação do problema). No caso do problema de alocação de chaves, não é necessário nenhum tipo de codificação especial, pois o vetor de variáveis de decisão x pode ser representado mapeado diretamente para uma *string* binária de comprimento n .

O processo de otimização segue os seguintes passos: i) inicialização da população; ii) avaliação da função objetivo e restrições; iii) seleção; iv) *crossover* e mutação; e v) critério de parada.

A inicialização (formação da primeira população) do algoritmo genético foi realizada utilizando SEF descrito na seção 3. A informação sobre potencial de um ramo para instalação de uma chave, fornecida pelo SEF, é utilizada na formação da população inicial do AG, da seguinte forma:

i) gerar um número aleatório X^{unif} com distribuição uniforme no intervalo $[0,1]$;

ii) comparar X^{unif} com o valor do benefício associado com a instalação de uma chave (B_i):

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{se } X^{unif} \leq B_i \\ 0, & \text{se } X^{unif} > B_i \end{cases}$$

iii) repetir os passos (i) e (ii) para $i=1, \dots, n$

iv) repetir os passos (i)-(iii) para todos os indivíduos que formam a população do AG.

Por outro lado, no processo de inicialização aleatória, não são utilizados os valores de benefício obtidos através do SEF, sendo atribuído a cada posição x_i o valor 0 ou 1, com probabilidade de 50%.

Neste artigo foi utilizada uma população de 150 indivíduos. Com a população inicial do algoritmo formada, o valor da função objetivo é então obtido para cada indivíduo da população, calculando-se o índice de confiabilidade $\tilde{E}[DEC]$ através do MAEE descrito na seção 2.

O próximo passo do AG é escolher os indivíduos da próxima geração, utilizando os operadores de

seleção, *crossover* (recombinação), mutação e elitismo. O operador de seleção utiliza o método do torneio entre dois indivíduos. O indivíduo com uma melhor função objetivo é escolhido com uma probabilidade de 70%. Além disso, o *crossover*, que gera indivíduos da próxima geração a partir da recombinação de informações de indivíduos da população atual, foi utilizado na formação de 65% dos indivíduos da próxima geração. A mutação, utilizada para aumentar a diversidade populacional, foi aplicada com uma taxa de 0,5%. O elitismo, que tem por finalidade guardar os melhores indivíduos da população atual, foi usado para formar 3% da população da nova geração. É importante mencionar que alguns indivíduos da nova geração podem violar a restrição associada com o número máximo de chaves instaladas (equação (7)). Neste artigo, a factibilidade de um indivíduo da nova geração é restaurada usando um algoritmo de reparo determinístico (Michalewicz, 1996). O algoritmo de reparo é utilizado para restaurar os indivíduos que violam as restrições, é executado como se segue:

i) ordenar em ordem crescente a lista de benefícios (B_i) para instalação das chaves.

ii) percorrer a lista de ordenada de benefícios (B_k) para $k=1, \dots, n$, fazendo com que:

$$x_k = 0; \text{ enquanto: } \sum_{k=1}^n x_k > n^{\max}$$

iii) repetir o passo (ii) para todos os indivíduos que violem a restrição associada com o número máximo de chaves instaladas.

Finalmente, o critério de parada do algoritmo foi definido como sendo o número de gerações igual a 300. O critério de parada foi selecionado para viabilizar a comparação entre diferentes técnicas de otimização para este problema. Os principais passos do AG proposto para a solução do problema de alocação de chaves são apresentados na Figura 3.

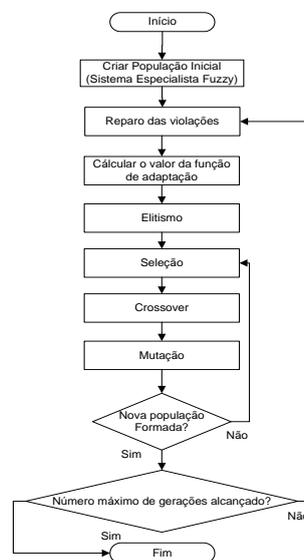


Figura 3. Fluxograma do AG proposto para o problema de alocação de chaves.

6 Resultados

O algoritmo proposto foi testado em uma rede de distribuição da CEMAR. Essa rede pertence à subestação Renascença, localizada na cidade de São Luís – MA. As características desta rede são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2. Características referentes à subestação Renascença - CEMAR

Nº de Consumidores	27.474
Potência Nominal	146.849,5 kW
Nº de Chaves NA	33
Nº de Chaves NF	75
Nº de Pontos de Carga	809
Nº de Componentes	4.950
Comprimento Total	103,5 km
$\tilde{E}[DEC]$ (horas/ano)	1,88946
$\tilde{E}[FEC]$ (falhas/ano)	1,00897

O algoritmo de alocação ótima de chaves foi aplicado no sistema-teste considerando quatro casos de estudo:

Caso 0: sistema original com 75 chaves (caso-base);

Caso 1: Alocação de 50 chaves seccionadoras na rede, desconsiderando as chaves já instaladas;

Caso 2: Realocação das chaves já instaladas na rede (75 chaves);

Caso 3: Alocação de 100 chaves na rede, desconsiderando as chaves já instaladas.

Os resultados obtidos para cada caso de estudo são mostrados na Tabela 3. Além disso, os diagramas unifilares no formato GIS para os casos de estudo 1, 2 e 3 são mostrados nas Figuras 4, 5 e 6, respectivamente. Nestas figuras, as estrelas de cor verde indicam os ramos da rede onde novas chaves foram instaladas e as estrelas de cor rosa indicam as chaves existentes que foram preservadas pelo algoritmo.

Os resultados apresentados na Tabela 3 mostram que diminuindo em 1/3 o número de chaves instaladas na rede (Caso 1), com relação ao caso-base, ocorre um aumento no valor do $\tilde{E}[DEC]$ de aproximadamente 5%. Executando uma realocação das chaves já instaladas na rede (Caso 2) é obtida uma redução de 9,38% no valor do $\tilde{E}[DEC]$ em comparação com o caso-base. Além disso, alocando-se 100 chaves na rede de distribuição do sistema (Caso 3), é obtida uma melhora de 17,16% no valor do $\tilde{E}[DEC]$.

Tabela 3. – Resultado dos casos de estudo

Caso de Estudo:	$\tilde{E}[DEC]$ [horas/ano]
Caso 0	1,88946
Caso 1	1,98881
Caso 2	1,71207
Caso 3	1,56528

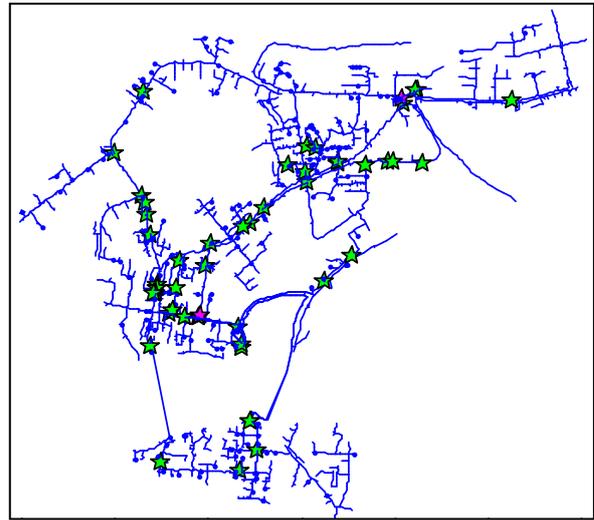


Figura 4. Topologia da rede para o Caso de Estudo 1.

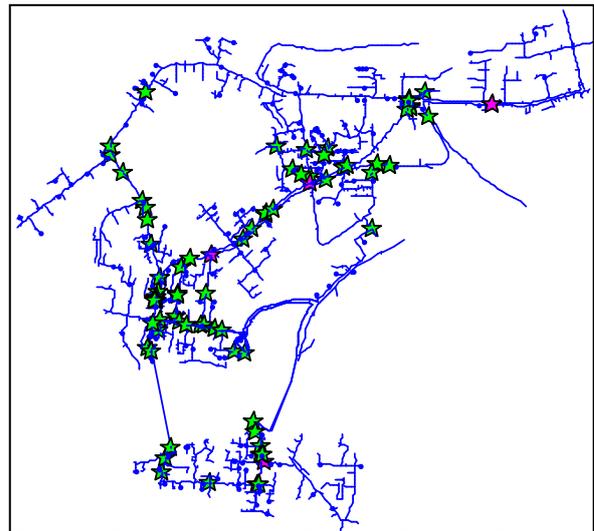


Figura 5. Topologia da rede para o Caso de Estudo 2.

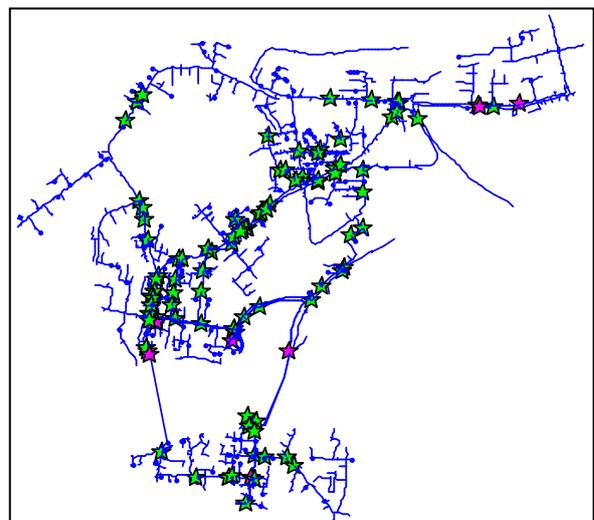


Figura 6. Topologia da rede para o Caso de Estudo 3.

Os resultados mostram que o $\tilde{E}[DEC]$ de uma rede de distribuição é sensível à quantidade e ao

posicionamento das chaves instaladas. Através da realocação é possível melhorar o $\tilde{E}[DEC]$ com um baixo custo para a empresa de energia elétrica. A redução no $\tilde{E}[DEC]$ tem como consequência direta uma melhoria nos índices de confiabilidade da rede associados com o tempo de restauração.

A Figura 7 apresenta uma comparação entre duas versões do AG:

i) **AG + SEF**: método proposto formado pela combinação do AG com o SEF

ii) **AG convencional**: AG com os mesmos parâmetros da metodologia proposta, com a diferença de que apresenta inicialização aleatória e não utiliza o algoritmo de reparo para os indivíduos que violam a restrição do número de chaves instaladas.

Através da análise da Figura 7 pode-se ver que a metodologia proposta apresenta soluções e taxas de convergência melhores que aquelas associadas com o AG convencional.

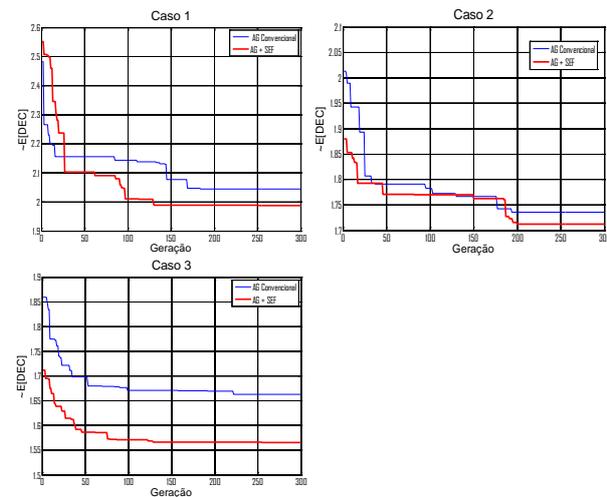


Figura 7. Comparação entre o método proposto (AG + SEF) e o AG Convencional.

4 Conclusão

Este artigo apresenta uma metodologia para a alocação ótima de chaves seccionadoras em redes de distribuição de energia elétrica. Essa metodologia considerou a aplicação de métodos analíticos para a estimação da confiabilidade e a utilização de um algoritmo de otimização híbrido: um Algoritmo Genético (AG) combinado com um Sistema Especialista Fuzzy (SEF). A introdução do SEF na inicialização da população e no reparo dos indivíduos resultou em melhorias significativas na taxa de convergência e na qualidade das soluções com relação ao AG Convencional. Estes resultados demonstram que a inserção da experiência dos engenheiros de planejamento via SEF em algoritmos de otimização, baseados em meta-heurísticas, tem grande potencial para melhorar a qualidade das soluções obtidas por estes algoritmos. A aplicação do método proposto em sistemas reais de grande porte demonstrou que é possível

obter reduções significativas no índice $\tilde{E}[DEC]$ com a instalação de chaves nos alimentadores.

Referências Bibliográficas

- Alves da Silva, A. P. & Falcão, D. M. (2008) Fundamentals of Genetic Algorithms, em Modern Heuristic Optimization Techniques-Theory and Applications to Power Systems, editado por K. Y. Lee, M. A. El-Sharkawi, Wiley.
- Billinton, R. & Jonnavithula, S. (1996) Optimal Switching Device Placement in Radial Distribution Systems, IEEE on Trans. Power Delivery, 11 (3) Jul., pp. 1646 – 1651.
- Brown, R. E., Gupta, S., Christie, R. D. & Venkata, S. S. (1996) A Genetic Algorithm for Reliable Distribution System Design. Intelligent Systems Applications to Power Systems-ISAP'96, pp. 29-33, Orlando, EUA.
- Brown, R. E. (2000) The impact of heuristic initialization on distribution system reliability optimization. International Journal of Engineering Intelligent Systems for Electrical Engineering and Communications, 8 (1) março, pp. 45-52.
- Brown, R. E. (2009) Electric Power Distribution Reliability. CRC Press.
- El-Hawary, M. E. (1998) Electric Power Applications of Fuzzy Systems. IEEE Press.
- Gomide, F., Gudwin, R. & R. Tanscheit (1995) Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações Proceedings 6th IFSA World Congress, Tutorials, pp. 1-38, São Paulo, Brasil.
- Lambert-Torres, G. (2008) Fuzzy Systems, editado por K. Y. Lee, M. A. El-Sharkawi, Wiley.
- Pacheco, M. A. C. & Vellasco, M. M. B. R. (2007) Sistemas Inteligentes de Apoio à Decisão. Interciência.
- Mendel, J. (1995) Fuzzy Logic Systems for Engineering. Proc. of the IEEE, 83 (3) Mar., pp. 345-377.
- Michalewicz, M. (1996) Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. Springer.
- Teng, J. & Lu, C. (2002) Feeder-Switch Relocation for Customer Interruption Cost Minimization. IEEE Trans. On Power Delivery, 17 (1) Jan., pp. 254-259.
- Tsao, T., Chang, Y. & Tseng, W. (2005) Reliability and Costs Optimization for Distribution System Placement Problem. Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Dalian, China.
- Wenyu, Y., Jian, L., Jianmin, Y., Hipeng, D. & Meng, S. (2004) Optimal Allocation of Switches in Distribution Network. Intelligent Control and Automation, Hangzhou, China.