

ALGORITMO MEMÉTICO PARA ALOCAÇÃO ÓTIMA DE CHAVES MANUAIS E TELECOMANDADAS EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Laura Silva de Assis¹

E-mail: laura.assis@gmail.com

José Frederico Vizcaíno González¹

E-mail: jfv71@gmail.com

Fábio Luiz Usberti¹

E-mail: fusberti@yahoo.com

Christiano Lyra¹

E-mail: chrlyra@densis.fee.unicamp.br

Celso Cavellucci²

E-mail: celso@clctec.com.br

Fernando Von Zuben¹

E-mail: vonzuben@dca.fee.unicamp.br

*Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - UNICAMP
Cidade Universitária Zeferino Vaz, Av. Albert Einstein, 400. CEP:13083-852, Campinas - SP

²CLCTEC Consultoria
Rua Prof. Dr. Edgard Atra, 644, Campinas - SP

Resumo

Boa parte das falhas em sistemas elétrico de potência ocorrerem nas redes de distribuição. Por isso há um crescente interesse em análises e métodos que permitem aumentar a confiabilidade do sistema de distribuição de energia elétrica. Este trabalho propõe a instalação otimizada de chaves em locais apropriados nas redes de distribuição radial, para melhorar a confiabilidade do sistema e prover um serviço de qualidade. É proposta uma heurística construtiva que aloca chaves seccionadoras e de manobra, automáticas e manuais, minimizando custos de instalação e de energia não distribuída sob restrições de confiabilidade. Também é proposto um algoritmo memético com população estruturada e buscas locais, cujo bom desempenho é confirmado por estudos de caso com uma rede real de grande porte.

PALAVRAS-CHAVE: Otimização Combinatória, Confiabilidade em Redes de Distribuição, Alocação de Chaves, Algoritmo Genético.

Abstract

Given that most failures in power electric systems occur in distribution networks, there is an increasing interest in the reliability analysis of power distribution systems. This work proposes the optimized allocation of switch devices in appropriate locations of radial distribution networks, to improve the system reliability and provide a good quality of service. A constructive heuristic is proposed to allocate sectionalizers and tie switches, automatic and non-automatic, minimizing the cost of allocation and unsupplied energy under reliability constraints. A memetic algorithm with structured population and local searches is also proposed, and its good performance is confirmed by case studies with a large real life network.

KEYWORDS: Combinatorial Optimization, Distribution Networks Reliability, Switch Allocation, Genetic Algorithm.

1 Introdução

O problema de alocação de chaves em redes primárias de distribuição de energia elétrica possui o objetivo de determinar a quantidade, o tipo e os melhores locais para instalação de chaves, procurando aumentar a confiabilidade do sistema de distribuição e o benefício econômico para a empresa, através do acréscimo no faturamento e possíveis reduções de multas contratuais referentes a níveis mínimos de confiabilidade.

É estimado que cerca de 70% do tempo de interrupção total do sistema de energia está associado às falhas no sistema de distribuição primário (Billinton e Allan, (1996)). Uma forma de aumentar a confiabilidade e minimizar a energia não fornecida é através da alocação de chaves na rede.

A instalação de chaves seccionadoras (normalmente fechadas - NF) e de manobras (normalmente abertas - NA) busca melhorar os índices de confiabilidade do sistema de distribuição, como: frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora (FEC), duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC), frequência equivalente de interrupção individual por unidade consumidora (FIC), duração equivalente de interrupção individual por unidade consumidora (DIC) e energia não distribuída (END).

Na ocorrência de uma falha em um bloco do sistema de distribuição, os dispositivos de controle e proteção possibilitam reduzir o tempo de interrupção do serviço de fornecimento de energia elétrica. Se acionados adequadamente, permitem reduzir o tempo para localizar e isolar os defeitos, assim como para restaurar o serviço nas áreas não atingidas pelos defeitos. Portanto, a seleção do tipo de equipamento e sua localização devem seguir critérios operacionais e econômicos específicos, visando contribuir para melhora dos índices que medem a confiabilidade do sistema de distribuição.

A demanda crescente para melhorar a qualidade do serviço no sistema de distribuição aumenta a importância de automação da rede, incluindo investimentos em chaves telecomandadas (RCS), dado que a possibilidade de acionamento remoto das chaves contribui para reduzir o tempo de realização das operações de abertura e fechamento de chaves, abreviando assim o tempo de isolar o defeito e de transferir cargas.

Os estudos de otimização para alocação de chaves são recentes, sendo Levitin et al. (1995) uma das primeiras referências nesta área. De acordo com Billinton e Jonnavithula (1996), o problema de alocação de chaves pode ser formulado como um problema de otimização combinatorial, não sendo viável a utilização de algoritmos exatos para solucioná-los em redes de médio e grande porte. Devido a dificuldade de solução deste problema em sistemas reais, muitas heurísticas têm sido propostas a fim de encontrar boas soluções que se aproximem ao máximo da solução ótima.

Em Levitin et al. (1995), é proposto um algoritmo genético (AG) para alocação ótima de chaves em um sistema de distribuição de energia radial. O algoritmo proposto busca minimizar o custo total anual da energia não fornecida, causada por falhas na rede, e o investimento com a instalação de chaves. Os autores propõem duas abordagens: (i) somente alocação de chaves seccionadoras e (ii) alocação de chaves seccionadoras e de manobra, ambos com quantidades pré-determinadas de chaves. Para avaliação da abordagem proposta, foi utilizada uma rede com 96 seções, 52 pontos de carga e 40,55 km de comprimento. Uma outra abordagem utilizando AG básico para alocar chaves de manobra na rede de distribuição é proposta em Haghifam (2004). Neste trabalho, os autores utilizam uma função de pertinência (devidamente formalizada no contexto da lógica nebulosa) para determinar a importância da carga no processo de alocação das chaves.

Uma metodologia baseada na técnica de otimização *Simulated Annealing* para alocação de chaves seccionadoras foi apresentada em Billinton e Jonnavithula (1996). O algoritmo proposto é avaliado com duas redes diferentes: uma rede urbana (40MW) e outra rural (20MW). Os resultados alcançados conseguiram reduzir o custo total das chaves para os dois tipos de sistema utilizados nos testes. Em Carvalho et al. (2005), é apresentado o problema de alocação de chaves automáticas que possuem a propriedade de reduzir o tempo de isolamento e reconfiguração. Esse algoritmo possui três passos: 1. avaliar o benefício de cada chave alocada; 2. executar um algoritmo que particiona

o conjunto de soluções em subconjuntos independentes; 3. executar um algoritmo de alocação otimizada de chaves. O algoritmo foi testado com uma rede urbana com 15kV e verificou-se uma redução de 97% em média na quantidade de avaliações necessárias, reduzindo o tempo de isolamento e reconfiguração da falha.

Abordagens baseadas em sistemas de colônia de formigas para alocação e realocação de chaves e dispositivos de proteção são apresentadas em Teng e Liu (2003), Falaghi et al. (2009) e Tippachon e Rerkpreedapong (2009). Em Celli e Pilo (1999), foi proposto um algoritmo de programação dinâmica para encontrar soluções ótimas para o problema de alocação de chaves seccionadoras automáticas. No entanto, essa técnica tem complexidade exponencial no pior caso, o que inviabiliza sua aplicação em redes reais de grande porte.

Os estudos com alocações de chaves presentes na literatura indicam um benefício médio em torno de 30% a 50%, mostrando o impacto positivo que a aplicação de heurísticas pode causar no sistema de distribuição.

Esse artigo propõe um algoritmo memético que utiliza uma população estruturada e buscas locais para alocação de chaves seccionadoras e de manobra, ambas podendo ser telecomandadas ou manuais. Para avaliar a confiabilidade da rede, o algoritmo proposto usa principalmente dois índices: duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC) e energia não distribuída (END). A principal contribuição deste trabalho é a união de um conjunto de técnicas que permitem tratar redes de porte real, de dimensões não tratadas até então na literatura da área.

2 Indicadores de Confiabilidade

Em um esforço para melhorar o atendimento ao cliente, companhias de distribuição de energia elétrica estão se concentrando na melhoria da confiabilidade de seus sistemas.

Pode-se avaliar a confiabilidade dos sistemas de distribuição por meio de técnicas analíticas ou por simulação (métodos de Monte Carlo). Técnicas analíticas representam e analisam os índices de confiabilidade por modelos matemáticos, enquanto que os métodos de Monte Carlo estimam os índices de confiabilidade simulando o comportamento estocástico do sistema (Billinton e Allan, (1992)). Ambas as técnicas possuem vantagens e desvantagens: técnicas analíticas requerem um esforço computacional menor, mas são menos flexíveis para lidar com as incertezas dos parâmetros do sistema elétrico. Por outro lado, os métodos de Monte Carlo requerem um esforço computacional maior, mas possuem uma capacidade melhor para lidar com a incerteza dos parâmetros e com o comportamento aleatório. Neste trabalho, é proposto um método analítico para avaliar a confiabilidade da rede.

O modelo analítico tratado neste trabalho considera os sistemas de distribuição de energia elétrica representados por um conjunto de componentes em série, incluindo linhas, dispositivos de proteção, chaves seccionadoras (NF) e chaves de manobras (NA), que necessitam estar em operação para os sistemas atenderem as demandas dos consumidores. A falha de um desses componentes causa a interrupção do fornecimento de energia e, conseqüentemente, a redução dos indicadores de confiabilidade do sistema.

A confiabilidade de sistemas de distribuição pode ser avaliada por um conjunto de índices, que fornecem informações de médias, em geral com bases anuais. Neste trabalho, três índices de confiabilidade são utilizados: frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora (FEC), duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC) e energia não distribuída (END). Os parâmetros de referência utilizados para a definição dos índices de confiabilidade são:

$$\lambda_b = \sum_{i \in b} \lambda_i, \quad U_b = \sum_{i \in b} \lambda_i r_i, \quad r_b = \frac{U_b}{\lambda_b} = \frac{\sum_{i \in b} \lambda_i r_i}{\sum_{i \in b} \lambda_i}, \quad L_b = fc \sum_{i \in b} L_i. \quad (1)$$

sendo que λ_b é a taxa média de falhas anuais no setor b , λ_i é a taxa de falhas do componente i pertencente ao setor b , U_b é o tempo total esperado de falta de suprimento de energia no setor b , r_b representa a duração média das interrupções do setor b , r_i é a duração média de interrupção do componente i , L_b representa a carga média anual do setor b , L_i é a demanda máxima no ponto de carga i e fc corresponde ao fator de carga no sistema de distribuição.

Um setor é definido como um conjunto de nós delimitados por dispositivos de proteção ou por chaves. Os índices de confiabilidade podem ser calculados da seguinte forma:

$$FEC = \frac{\sum_{b \in B} \lambda_b N_b}{\sum_{b \in B} N_b}, \quad DEC = \frac{\sum_{b \in B} U_b N_b}{\sum_{b \in B} N_b}, \quad END = \sum_{b \in B} \lambda_b r_b L_b. \quad (2)$$

onde B representa o conjunto de setores da rede e N_b é o número de consumidores atendidos no setor b . Analiticamente, o FEC expressa a quantidade média de falhas durante um ano (período utilizado neste trabalho). Este índice foi usado para ajustar a taxa média de falhas λ_b definida na Equação (1). O DEC expressa a duração média de falta de suprimento de energia durante um ano, enquanto que o END representa o total de energia não distribuída ao longo de um ano.

3 Modelo Matemático

O sistema de distribuição de energia radial contém B setores, o qual pode ser modelado por um grafo $G(N, E)$, sendo que N é o conjunto dos n nós e E é o conjunto das m arestas. Cada nó v_i , com $1 \leq i \leq n$ corresponde a uma conexão ou ponto de carga e cada aresta j , com $1 \leq j \leq m$, corresponde a um trecho da rede, chave ou dispositivo de proteção. O modelo matemático proposto utiliza a energia não distribuída na rede juntamente com o custo das chaves como função objetivo a ser minimizada.

A solução do problema de alocação de chaves deve definir os melhores tipos e locais de chaves na rede de distribuição de energia. As variáveis de decisão definidas a seguir representam os tipos e locais para instalação das chaves seccionadoras (NF) e de manobra (NA) de diversos tipos, definidos por suas capacidades e se são automáticas ou manuais.

$$x_{ij}^s = \begin{cases} 1, & \text{se uma chave seccionadora do tipo } s \in S \text{ for alocada ao trecho } (i, j) \in E; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$y_{ij}^s = \begin{cases} 1, & \text{Se uma chave de manobra do tipo } s \in S \text{ for alocada ao trecho } (i, j) \in E; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

sendo que X é o conjunto de chaves seccionadoras ($x_{ij}^s = 1$) e Y é o conjunto de chaves de manobra ($y_{ij}^s = 1$) alocadas na rede. O conjunto S contém o tipo da chave, definido por sua capacidade e funcionalidade. A formulação matemática para o problema de alocação de chaves, apresentado neste trabalho, pode ser modelado da seguinte forma:

$$\min c^e END(X,Y) + \sum_{s \in S} \sum_{(i,j) \in E} c^s (x_{ij}^s + y_{ij}^s) \quad (3)$$

$$s.a. DEC(X,Y) \leq DEC_{\max} \quad (4)$$

$$x_{ij}^s + y_{ij}^s \leq 1 \quad \forall (i,j) \in E, \forall s \in S \quad (5)$$

$$\sum_{j \in A_i} (f_{ji} - f_{ij}) \leq l_i \quad \forall i \in V \quad (6)$$

$$f_{ij} x_{ij}^s \leq F^s \quad \forall (i,j) \in E, \forall s \in S \quad (7)$$

$$f_{ij} y_{ij}^s \leq F^s \quad \forall (i,j) \in E, \forall s \in S \quad (8)$$

$$END = \sum_{i \in V} l_i U_i \quad (9)$$

$$DEC = \frac{\sum_{i \in V} N_i U_i}{\sum_{i \in V} N_i} \quad (10)$$

$$U_i = \lambda_i r_i(X,Y) \quad \forall i \in V \quad (11)$$

$$x_{ij}^s, y_{ij}^s \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in E, \forall s \in S \quad (12)$$

$$f_{ij} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in E \quad (13)$$

onde f_{ij} é o fluxo de potência que passa pelo arco $(i,j) \in E$, A_i é o conjunto de nós adjacentes ao nó i , F^s é o fluxo máximo permitido para uma chave do tipo s , N_i é o número de consumidores atribuídos ao nó i , c^e é o custo da energia, c^s é o custo da aquisição e instalação de uma chave do tipo s e DEC_{\max} é o valor máximo permitido para o DEC.

A função objetivo (3) minimiza os custos de energia não distribuída e de instalação de chaves na rede. A restrição (4) limita o índice de confiabilidade DEC. A restrição (5) garante que chaves seccionadora e de manobra não serão ambas instaladas no mesmo trecho. Restrições (6) garantem o balanceamento de fluxos de potência, onde o fluxo de entrada de cada nó deve ser igual ao fluxo de saída mais a demanda do nó. Restrições (7) e (8) representam os fluxos de potência máximos permitidos por trecho, de acordo com o tipo da chave alocada. Os valores do END , DEC e U_i em função das chaves alocadas na rede (X,Y) são definidos pelas restrições (9), (10) e (11) respectivamente. A natureza binária das variáveis de decisão e a não-negatividade dos fluxos são representadas pelas restrições (12) e (13).

4 Método de Solução

O método de solução desenvolvido para o problema de alocação de chaves pode ser dividido em duas partes: a avaliação da confiabilidade e o otimizador. A avaliação é composta por procedimentos analíticos para calcular os índices de confiabilidade da rede. O otimizador é uma metodologia de busca aplicada ao problema, visando identificar soluções ótimas ou mais apropriadas. Neste trabalho, propõe-se um algoritmo memético com população estruturada, para buscar a melhor solução para o problema de alocação de chaves.

4.1 Técnica de Avaliação

O modelo analítico de avaliação da confiabilidade realiza o ajuste de dois parâmetros, taxa de falhas (λ) e tempo total de restauração (t_{rr}), a partir de valores históricos dos índices de confiabilidade. O modelo utiliza alguns parâmetros como: λ_{km} é o vetor de taxas de falhas por quilômetro dos alimentadores, FEC_{hist} e DEC_{hist} representam o vetor de valores do FEC e DEC para os alimentadores, obtidos pelo histórico de confiabilidade do sistema, e μ é o vetor de médias de tempo de restauração de interrupções dos alimentadores. A confiabilidade do sistema de distribuição é calculada para cada um dos alimentadores da rede, como mostrado no Algoritmo 1.

Algoritmo 1: Confiabilidade do Sistema de Distribuição.

Entrada: $G = (N, E)$, λ_{km} , μ , DEC_{hist} , FEC_{hist} , $ajuste$.

Saída: FEC , DEC , END .

```

1 início
2   se  $ajuste = true$  então
3      $\lambda \leftarrow AjusteTaxaFalha(G, \lambda_{km}, FEC_{hist});$ 
4      $t_r \leftarrow AjusteTempoReparo(G, \mu, DEC_{hist});$ 
5   senão
6      $\lambda \leftarrow \lambda_{km};$ 
7      $t_r \leftarrow \mu;$ 
8   para cada alimentador  $j \in G$  faça
9      $FEC_j \leftarrow CalculaFEC(G, j);$ 
10     $DEC_j \leftarrow CalculaDEC(G, j);$ 
11     $END_j \leftarrow CalculaEND(G, j);$ 

```

No Algoritmo 1, $ajuste$ é um parâmetro binário que indica se o algoritmo irá ajustar os valores de λ e r .

4.2 Algoritmo Memético

A alocação de chaves é um problema combinatório e seu espaço de solução é limitado pelo número das diferentes possibilidades de realizar a alocação, referindo-se às possíveis combinações de posições e tipos das chaves disponíveis. Dado que $|E|$ é o número de arestas e $|S|$ é o número de tipos de chave, então para cada aresta, um processo de otimização tem que escolher uma entre $|S|$ possibilidades. Isso significa que o espaço de busca tem $(|S| + 1)^{|E|}$ soluções em potencial, considerando a possibilidade de ausência de chaves nas arestas.

Soluções de alta qualidade, não necessariamente ótimas, podem ser encontradas usando metaheurísticas. Este trabalho propõe uma abordagem baseada em algoritmo memético (Moscato e Normam (1992)).

No algoritmo, cada indivíduo é representado por um cromossomo, o qual é uma cadeia de genes que expressa uma solução candidata do problema. Na codificação proposta neste trabalho, cada cromossomo é definido por dois vetores contendo números inteiros no intervalo $[0, |S|]$, onde cada posição do cromossomo representa um trecho candidato a receber chave, 0 indica que não foi alocado chave neste trecho e valores no intervalo $[1, |S|]$ indicam o tipo da chave alocada no trecho. A Figura 1 exemplifica essa estrutura de dados, onde N_s é a quantidade de trechos candidatos a receber uma chave seccionadora e N_m é a quantidade de trechos candidatos a receber uma chave de manobra.

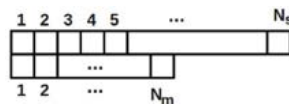


Figura 1: Cromossomo.

Neste trabalho, foi utilizada uma população estruturada que organiza os indivíduos em uma árvore ternária com 3 níveis e um número fixo de 13 indivíduos (Figura 2). Nesta estrutura, a população é formada hierarquicamente por indivíduos líderes e subordinados. Esta classificação é feita de acordo com o valor da solução que cada indivíduo apresenta. Todo nó raiz possui um *fitness* melhor que seus nós filhos. Logo, o indivíduo 1 apresenta a melhor solução encontrada na população, sendo líder dos indivíduos 2, 3 e 4. O indivíduo 2 é líder dos indivíduos 5, 6 e 7 e assim sucessivamente. A ideia ao se estruturar a população é realizar um número menor de avaliações do *fitness*, reduzindo o tempo computacional sem perder a qualidade da solução final.

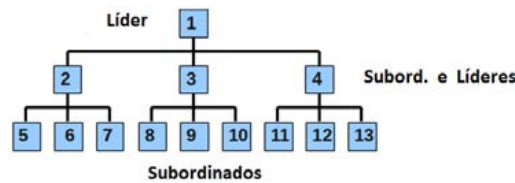


Figura 2: Representação de População Estruturada.

4.2.1 Geração da População Inicial

A geração da população inicial é realizada por uma heurística construtiva gulosa, onde os trechos candidatos a receber chave são classificados de acordo com o benefício trazido pela instalação de uma chave. O método continua a alocação de chaves na rede de forma aleatória, dando maior probabilidade de escolher os trechos cujo benefício é maior. A escolha da chave para um determinado trecho ocorre selecionando a chave de menor custo com capacidade suficiente. O método continua alocando chaves até encontrar uma solução em que o DEC atenda a restrição apresentada na Equação (4).

4.2.2 Avaliação

A avaliação é feita através de uma função que melhor representa o problema e possui o objetivo de fornecer uma medida de aptidão de cada indivíduo na população corrente. Tal medida irá dirigir o processo de busca. Essa função também é conhecida como função de *fitness*. Quanto melhor a solução maior é o valor da função de *fitness*. Neste trabalho, foi utilizado o inverso da função objetivo, na forma:

$$\frac{1}{c^e END(X, Y) + \sum_{s \in S} \sum_{(i,j) \in E} c^s (x_{ij}^s + y_{ij}^s)} \quad (14)$$

4.2.3 Seleção

Devido à utilização da população estruturada, a seleção é realizada a partir da estrutura definida, onde todos os pares de indivíduos líderes e subordinados são selecionados para participar do cruzamento.

4.2.4 Cruzamento

O cruzamento é o principal operador genético, o qual combina as informações genéticas de dois indivíduos progenitores para gerar novos indivíduos descendentes. O crossover é realizado entre todo par de indivíduos líder e subordinado. Foi utilizado o cruzamento de 1-ponto, de modo que é definido um valor aleatório entre zero e o tamanho do cromossomo para cada par de indivíduos e cada vetor do cromossomo. Esse valor define um ponto que divide o cromossomo em duas partes. Dessa forma, o descendente gerado é formado pela cópia da primeira parte do indivíduo líder e pela cópia da segunda parte do indivíduo subordinado. A Figura 3 ilustra esse operador.

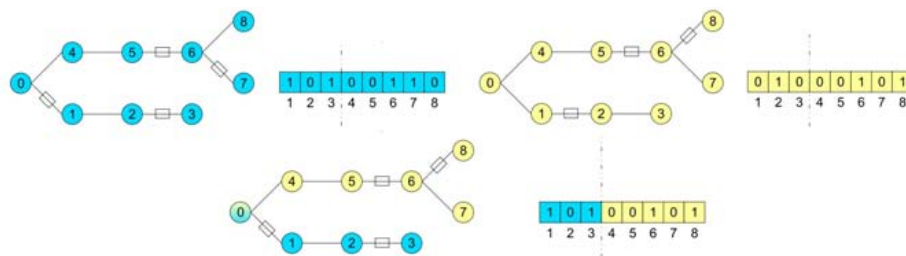


Figura 3: Cruzamento em 1-ponto.

4.2.5 Mutação

A mutação é a mudança ou troca de um ou mais alelos do cromossomo, a qual é aplicada ao descendente obtido após o crossover com probabilidade p_m . Esse operador é executado com o objetivo de adicionar diversidade à população. Quando um alelo é escolhido para sofrer mutação, o método considera três possibilidades:

- **Arco sem chave:** O processo de mutação aloca uma chave manual;
- **Arco com chave telecomandada:** O processo de mutação substitui a chave telecomandada por uma chave manual;
- **Arco com chave manual:** O processo de mutação pode remover a chave ou substituir por uma telecomandada (operações com igual probabilidade de ocorrência);

4.2.6 Factibilização

A factibilidade dos indivíduos da nova geração pode ser restaurada usando um algoritmo de reparo (Michalewicz, (1996)) a fim de restaurar os indivíduos que são inactíveis. É comum a solução resultante do cruzamento e mutação dos indivíduos líder e subordinado ser inactível, dado que essas soluções podem apresentar um valor de *DEC* inferior à restrição estipulada (Equação (4)). Neste trabalho, a heurística construtiva é utilizada para manter as soluções da nova geração factíveis. Para isso é alocado um número suficiente de chaves até que o *DEC* seja factível.

4.2.7 Busca Local

Algoritmos de busca local são utilizados para melhorar soluções iniciais analisando a vizinhança dessas soluções. Neste trabalho, são propostos três movimentos de busca local: inserção, remoção e troca de chaves. Através desses operadores, a partir da solução atual, a busca local percorre sua vizinhança em busca de melhores soluções. Se tal solução vizinha for encontrada, esta torna-se a nova solução corrente. Se nenhuma solução melhor for encontrada, então a solução corrente está localizada em um ótimo local em relação à vizinhança proposta.

A estratégia de busca utilizada neste trabalho foi *first-improvement* sendo que para cada solução vizinha é verificado o valor da função objetivo e a solução atual é substituída pela primeira solução vizinha que possui um valor melhor que a atual.

- **Definição da Vizinhança:** A busca proposta utiliza vizinhança restrita. Neste trabalho, uma solução vizinha à solução S_C é definida como uma solução pertencente ao conjunto $N(S_C)$, que pode ser descrito da forma:

$$N(S_C) = \begin{cases} (S_C \setminus \{c\} \cup \{a\}); \\ (S_C \setminus \{c\}); \\ (S_C \cup \{a\}). \end{cases} \quad (15)$$

$N(S_C)$ é a vizinhança da solução S_C , C é o conjunto de arcos que possuem chaves alocadas na solução S_C , E é o conjunto de todos os arcos da rede, $c \in C$, $a \in E$ e $a \notin C$. Para facilitar o processo de busca, é criada uma matriz de adjacências de vizinhos que possui dimensão $m \times m$ sendo m o número de arcos da rede em estudo. A matriz de adjacências pode ser definida da forma:

$$M = m_{ij} \begin{cases} 1 & \text{se o arco } j \text{ for vizinho do arco } i; \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Essa matriz é construída de acordo com um parâmetro do algoritmo que define o tamanho da vizinhança, o qual indica a distância máxima permitida entre dois arcos para que estes sejam considerados arcos vizinhos.

- **Movimento:** Após a geração da população inicial e a aplicação dos operadores genéticos, um indivíduo é selecionado para a execução da busca local. O indivíduo localizado no topo da árvore tem probabilidade menor de ser selecionado, dado que este representa a melhor solução da população. Os demais indivíduos possuem a mesma probabilidade de serem selecionados. Três movimentos diferentes são executados na busca local:
 - **Inserção:** Insere chave em um arco.
 - **Remoção:** Remove chave de um arco.
 - **Troca:** Procura por dois arcos, pelo menos um com chave, e realiza a troca de suas chaves.

No processo de busca local, todos os movimentos tem igual chance de serem escolhidos, e se nenhum resultar em melhorias do *fitness* a busca é encerrada.

O Algoritmo 2 mostra o pseudo-código de um algoritmo memético com população estruturada.

Algoritmo 2: Algoritmo Memético - População Estruturada

```

1 início
2    $t \leftarrow 0$ ;
3   Gere a população inicial  $P(t)$ ;
4   Calcule o fitness para cada indivíduo da população  $P(t)$ ;
5   Ordene a árvore de acordo com o valor do fitness;
6   enquanto Critério de parada não for satisfeito faça
7     Selecione todo par de indivíduo líder, subordinado;
8     para Todo par de indivíduo selecionado faça
9       Aplique crossover gerando os descendentes;
10      Guarde os descendentes com referência aos indivíduos subordinados;
11      Realize a mutação nos descendentes;
12      Armazena na população o melhor indivíduo entre descendentes e
        subordinados;
13      Aplique a busca local nos descendentes;
14      Calcule o fitness para cada indivíduo da população  $P(t)$ ;
15      Reordene a árvore de acordo com o valor do fitness;
16       $t \leftarrow t + 1$ ;

```

5 Estudos de Caso

Nessa seção, são apresentados os resultados obtidos com a implementação do algoritmo proposto, testado com uma rede real urbana de distribuição. A Tabela 1 mostra as características da rede em estudo, a qual foi elaborada a partir de informações de redes reais em operação no país. Tabela 2 mostra as informações dos tipos de chaves possíveis de serem alocadas. A dimensão do espaço de busca da rede em estudo é de 7^{5887} soluções possíveis. Os valores adotados para os parâmetros do problema se encontram na Tabela 3.

Tabela 1: Informações Gerais da Rede.

Número de nós	5818
Número de arcos	5887
Número de seções	580
Número de alimentadores	12
Número total de clientes	41183
Número de clientes do maior bloco	1028
Comprimento do maior bloco [m]	34005

Tabela 2: Informações Gerais das Chaves.

ID	Capacidade (A)	Tipo	Custo (R\$)
C100	100,0	M	2817,00
C200	200,0	M	3817,00
C400	400,0	M	5017,00
C600	600,0	M	6185,00
A400	400,0	A	25000,00
A600	600,0	A	35000,00

Na Tabela 2, coluna Tipo, *M* indica chave manual e *A* indica chave automática. Todas as chaves podem ser usadas como seccionadora (NF) ou de manobra (NA).

Tabela 3: Parâmetros do Problema.

Parâmetro	Valor	Unidade
Custo de energia	200,00	[R\$/MWh]
Fator de carga	0,6	
Taxa de juros	10,0	[%]
Tempo de amortização	15	[anos]
Taxa de falha	0,8	[falhas/km/ano]
Tempo de localização da falha (t_l)	0,2	[horas]
Tempo de transferência de energia (t_t)	0,1	[horas]
Tempo de reparo da rede (t_r)	1,0	[horas]
Custo de chave manual com capacidade 100 [A]	2.817,00	[R\$]
Custo de chave manual com capacidade 200 [A]	3.817,00	[R\$]
Custo de chave manual com capacidade 400 [A]	5.017,00	[R\$]
Custo de chave manual com capacidade 600 [A]	6.185,00	[R\$]
Custo de chave automática com capacidade 400 [A]	25.000,00	[R\$]
Custo de chave automática com capacidade 600 [A]	35.000,00	[R\$]

Os valores de custo e outras informações apresentadas nas Tabelas 2 e 3 correspondem a valores aproximados daqueles comumente praticados pelo mercado e pelas empresas de distribuição de energia elétrica, com alguns deles sendo específicos para a rede em estudo.

A rede do estudo de caso possui carga total de 40MW, comprimento de 541Km e 41.184 consumidores. A Tabela 4 exibe os resultados numéricos alcançados com a execução do algoritmo proposto. Primeiramente, foi realizada a avaliação da rede com a configuração vigente. Além de considerar as chaves (NF e NA), o avaliador também considera os dispositivos de proteção previamente instalados na rede. Pela solução vigente, verifica-se que a rede atual não possui chaves automáticas instaladas. Posteriormente, foi considerada a rede contendo apenas os dispositivos de proteção (sem chaves alocadas). Neste cenário, a heurística construtiva é executada e a melhor solução é armazenada. Com o mesmo cenário, executa-se o algoritmo memético mantendo a melhor solução.

Tabela 4: Resultados para a Rede em Estudo.

Alimentador	Solução Vigente			Heurística Construtiva					Algoritmo Memético				
	DEC	Custo	Chaves	DEC	Custo	Redução de Custo	Chaves	Tempo	DEC	Custo	Redução de Custo	Chaves	tempo
1	3,37	8591,02	14	3,37	2788,62	67,54	4	00:00:07	3,30	2568,12	70,11	4	00:05:44
2	5,39	21715,66	38	5,34	9877,79	54,51	15	00:00:36	5,28	7085,53	67,37	6	00:10:01
3	5,98	19384,76	34	5,24	7256,23	62,57	11	00:00:42	5,56	6385,96	67,06	6	00:10:04
4	2,31	5581,22	8	2,30	1271,16	77,22	1	00:00:01	2,30	1271,16	77,22	1	00:00:38
5	5,98	15206,16	25	4,28	5119,80	66,33	5	00:00:13	5,17	5477,08	63,98	6	00:10:01
6	7,41	14076,57	27	7,19	6712,83	52,31	9	00:01:34	7,03	5233,13	62,82	5	00:10:00
7	4,40	7896,46	13	3,69	6630,33	16,03	6	00:00:32	4,36	5497,55	30,38	3	00:10:00
8	1,81	3773,56	4	1,74	1921,77	49,07	1	00:00:00	1,74	1921,77	49,07	1	00:00:08
9	8,69	23719,59	36	8,21	14046,02	40,78	15	00:01:21	8,67	8392,92	64,62	9	00:10:06
10	8,18	26098,93	43	8,15	17653,09	32,36	22	00:01:09	7,40	6126,84	76,52	6	00:10:01
11	5,59	31885,28	57	5,59	14298,19	55,16	14	00:00:44	5,45	9746,36	69,43	10	00:10:02
12	11,44	21813,01	31	10,11	41052,62	-88,20	41	00:08:58	11,37	11326,63	48,07	14	00:10:05
total	7,32	199742,22	330	6,81	128628,44	35,60	144	00:15:57	7,00	71033,05	64,44	71	01:36:49

DEC - Índice de duração de interrupção média do sistema (hrs/cons/ano). Custo - Custo total da solução (R\$).
Redução de custo - Redução do custo comparado à solução vigente (%). Chaves - Número de chaves instaladas.
Tempo - Tempo de execução (hh:mm:ss).

As Figuras 4 e 5 exibem graficamente a solução vigente e a solução final proposta pelo algoritmo memético.

A solução atual possui 330 chaves instaladas com um custo total de energia não distribuída de R\$199.742,22 e um DEC de 7,32. O algoritmo proposto conseguiu reduzir esses valores para 71 chaves alocadas, com um custo total de energia não distribuída de R\$71.033,05 e um DEC de 7,00.

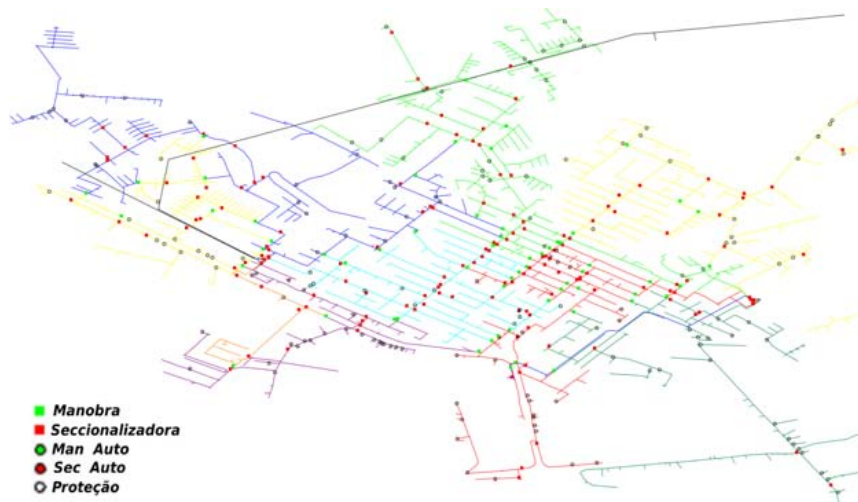


Figura 4: Rede com configuração original.

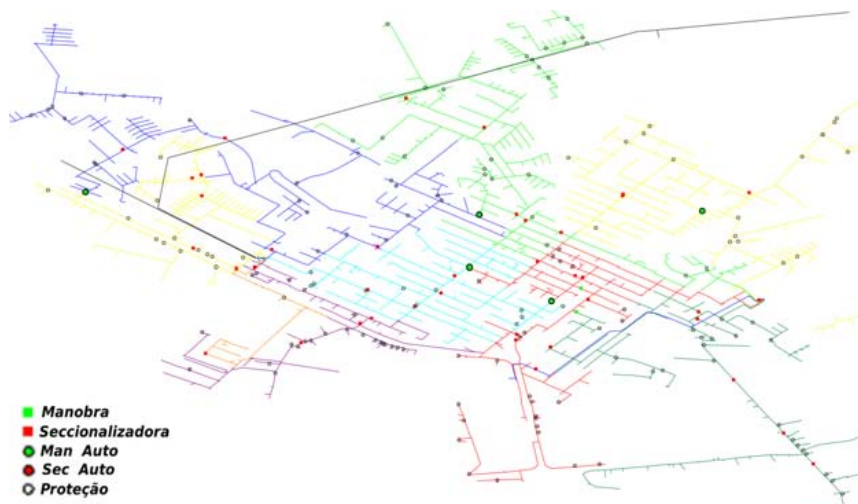


Figura 5: Solução Proposta.

Com o intuito de encontrar soluções de igual ou melhor confiabilidade, o valor de DEC da rede vigente foi utilizado com restrição de DEC_{max} na execução do algoritmo.

6 Conclusão

Este trabalho examinou o problema de alocação de chaves seccionadoras e de manobra automáticas e manuais em redes de distribuição de energia elétrica. Foi proposto um algoritmo composto por um avaliador analítico e uma metaheurística para otimização deste problema. Os resultados indicam que a abordagem proposta traz uma redução significativa no custo de chaves alocadas para as empresas de distribuição de energia.

O algoritmo memético proposto, por ser uma heurística populacional, apresenta um conjunto de soluções de boa qualidade. Essas soluções podem ser avaliadas por uma equipe de planejamento, a qual terá um conjunto de possibilidades de alocação a serem exploradas. As soluções propostas podem inclusive ser categorizadas por um critério adicional não previsto na otimização, como por exemplo, considerar a solução mais próxima da solução vigente, visando a redução de custos relacionados à realocação de chaves.

A metodologia proposta pode ser usada como uma ferramenta para auxiliar em decisões feitas pelas companhias no campo de planejamento e reconfiguração da rede, isolamento de falhas,

restauração da rede no sistema de distribuição de energia. Além de ser capaz de prover boas soluções, com esforço computacional aceitável, para redes reais em operação no país.

O uso de população estruturada foi motivado pelo fato do problema de alocação de chaves envolver avaliações sucessivas de confiabilidade, uma tarefa computacionalmente cara. A população estruturada, com um menor número de indivíduos, reduz consideravelmente o número de avaliações requeridas, quando comparado a um algoritmo genético convencional. Ao mesmo tempo, testes empíricos revelaram que a população estruturada consegue manter a qualidade das soluções propostas quando comparada com o emprego de população não-estruturada.

7 Agradecimento

Esta pesquisa contou com o apoio financeiro da CAPES, do CNPq e da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL).

Referências

- Billinton, R. & Allan, R. N. (1992). *Reliability Evaluation of Engineering Systems - concepts and Techniques*, Plenum Press, New York, EUA.
- Billinton, R. & Allan, R. N. (1996). *Reliability Evaluation of Power Systems*, Plenum Press, New York, EUA.
- Billinton, R. & Jonnavithula, S. (1996). Optimal switching device placement in radial distribution systems., *IEEE Transactions on Power Delivery* **11**(3): 1646–1.
- Carvalho, P. M. S., Ferreira, L. A. F. M. & Cerejo da Silva, A. J. (2005). A decomposition approach to optimal remote controlled switch allocation in distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery* .
- Celli, G. & Pilo, F. (1999). Optimal sectionalizing switches allocation in distribution networks, *IEEE Transactions on Power Delivery* **14**: 1167 – 1172.
- Falaghi, H., Haghifam, M. & C., S. (2009). Ant colony optimization-based method for placement of sectionalizing switches in distribution networks using a fuzzy multiobjective approach., *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY* **24**(1): 268–276.
- Haghifam, M. R. (2004). Optimal allocation of tie points in radial distribution systems using a genetic algorithm., *EUROPEAN TRANSACTIONS ON ELECTRICAL POWER* **14**: 85–96.
- Levitin, G., Mazal-Tov, S. & Elmakis, D. (1995). Genetic algorithm for optimal sectionalizing in radial distribution systems with alternative supply., *Electric Power Systems Research* **35**: 149–155.
- Michalewicz, Z. (1996). *Genetic algorithms + data structures = evolution programs*, 3rd edn, New York: Springer.
- Moscato, P. & Normam, M. (1992). A memetic approach for the travelling salesman problem: implementation of a computational ecology for combinatorial optimization on message-passing systems., *Conference on Parallel Computing and Transportation Applications* .
- Teng, J. & Liu, Y. (2003). A novel acs-based optimum switch relocation method., *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS* **18**(1): 113–120.

Tippachon, W. & Rerkpreedapong, D. (2009). Multiobjective optimal placement of switches and protective devices in electric power distribution systems using ant colony optimization., *Electric Power Systems Research* **79**(1): 1171–1178.