

Metodologia de Otimização para Instalação de Sinalizadores de Faltas em Redes de Distribuição de Energia Elétrica

Antônio A. Ferreira, Daniel R. Monaco, José F. Vizcaino Gonzalez, Celso Cavellucci,
Fábio J. de Andrade e Josué de Camargo

Resumo – Este artigo descreve uma metodologia para alocação de sinalizadores luminosos de faltas, buscando a redução do tempo médio de atendimento de uma ocorrência no sistema de distribuição de energia elétrica. O produto deste projeto de pesquisa inclui a metodologia de otimização traduzida no sistema computacional de apoio à tomada de decisão *Alocasin* para auxiliar no planejamento da alocação de sinalizadores de faltas. Esse sistema computacional permite a visualização gráfica do unifilar da rede em estudo, edição dos parâmetros da simulação, avaliação de soluções previamente elaboradas, seleção de alimentadores para a simulação e apresentação dos resultados na forma gráfica e em texto. O problema de alocação de sinalizadores de faltas é modelado como um problema de programação inteira e resolvido usando a metaheurística de algoritmos genéticos, usando população hierarquicamente estruturada. Estudos de casos foram elaborados usando três redes de distribuição selecionadas do sistema de distribuição da CPFL.

Palavras-chave – alocação de sinalizadores de faltas, algoritmos genéticos, confiabilidade, otimização combinatória, sistemas de distribuição.

I. INTRODUÇÃO

A confiabilidade dos sistemas de distribuição de energia elétrica pode ser definida pela probabilidade de seus componentes executarem suas funções adequadamente por um período de tempo. Os principais fatores usados para medir a confiabilidade são a frequência e a duração das interrupções ocorridas nestes sistemas. Esses fatores estão associados às condições dos equipamentos, comprimento dos alimentadores, carregamento do sistema, topologia da rede de distribuição, automação, dispositivos de proteção, perfil de carga dos consumidores e a capacidade de transferência de carga. Um conjunto de indicadores como FEC (*Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora*), DEC (*Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora*),

DIC (*Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora*) e TMA (*Tempo Média de Atendimento*) são utilizados, usualmente, como indicadores da qualidade dos serviços prestados pelas concessionárias de energia elétrica. Esses indicadores devem ser mantidos e monitorados pelas concessionárias em níveis sugeridos pela ANEEL.

Os sinalizadores de faltas são equipamentos que podem melhorar a confiabilidade dos sistemas de distribuição. Esses dispositivos, se instalados estrategicamente, auxiliam as equipes de manutenção na localização rápida e segura de defeitos nos componentes dos sistemas de distribuição [1]. Dessa forma, as concessionárias podem obter o benefício da redução do tempo na localização de seções da rede com defeito e, conseqüentemente, reduzir o tempo de interrupção do fornecimento de energia. Deste modo, existe a possibilidade de aumentar a produtividade das equipes de manutenção e diminuir os custos de operação do sistema.

Por outro lado, do ponto de vista dos consumidores, a redução no tempo de interrupção do fornecimento de energia pode significar menos inconvenientes aos consumidores residenciais e evitar a perda de produtividade dos consumidores comerciais e industriais. Tanto os benefícios da concessionária como dos consumidores podem ser quantificados na forma de ganhos em função da energia não fornecida durante interrupções permanentes e dos indicadores de confiabilidade do sistema.

A literatura disponível sobre o problema de alocação de sinalizadores de faltas (PASF) nos circuitos de distribuição de energia elétrica é escassa. Krajnak [1] analisa a influência da instalação dos dispositivos sinalizadores de faltas (DSF) nos índices de qualidade DEC e DIC. Os sinalizadores foram instalados em locais onde existiam ramificações no alimentador principal (tronco). Os resultados obtidos foram animadores, a distância percorrida pela equipe diminuiu 46%, o DEC diminuiu 15% e o DIC 26%, em comparação com a simulação sem sinalizadores instalados na rede. Inferência Nebulosa foi a técnica utilizada por Souza, Assis e Silva [2] para determinar locais candidatos à instalação dos DSF. A técnica de AG foi utilizada por Cong, Raison, Bonnoit, e Manjal [3] para localizar DSF na presença de geração distribuída. Nenhuma dessas últimas duas referências apresenta resultados claros sobre os ganhos obtidos com o uso das metodologias propostas.

A formulação para o PASF apresentada na Seção II caracteriza um problema de otimização combinatória [4], sendo as variáveis de decisão os locais candidatos e quantidade de

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

A. A. Ferreira e D. R. Monaco trabalham na CPFL (e-mails: arei-as@cpfl.com.br; daniel@cpfl.com.br).

J. F. V. Gonzalez e C. Cavellucci trabalham na CLCTEC Consultoria (e-mails: celso@clctec.com.br; jfvg@gmail.com).

F. J. de Andrade e J. de Camargo trabalham na Expertec (e-mails: fabi-o@expertec.com.br; josue@expertec.com.br).

conjuntos de DSF a serem instalados na rede de distribuição. A técnica de solução *Algoritmos Genéticos* (AG) é apresentada na Seção III e sua aplicação ao PASF é discutida na Seção IV.

O produto deste projeto de pesquisa inclui a metodologia de otimização traduzida no sistema computacional de apoio à tomada de decisão denominado *Alocasin*. Esse sistema, descrito na Seção V, foi concebido para auxiliar no planejamento da alocação de sinalizadores de faltas. Ele permite a visualização gráfica do unifilar da rede em estudo, edição dos parâmetros da simulação, avaliação de soluções previamente elaboradas, seleção de para a simulação, inclusão de sinalizadores existentes e novos e apresentação dos resultados na forma gráfica e em texto.

Estudos de casos de três redes foram elaborados para testar a metodologia desenvolvida. Os resultados são apresentados na Seção VI, mostrando ganhos significativos com a instalação de sinalizadores de faltas para redução do TMA, indicando que sua inserção no processo de planejamento mostra-se promissora.

Na Seção VII são apresentados comentários gerais sobre os produtos gerados no projeto de P&D LP02, “Lote Pioneiro e Inserção no Mercado do Sinalizador de Faltas Luminescente” – código ANELL PD-0063-0002/2009 – que será concluído em dezembro de 2011. Este projeto tem os objetivos de fabricar 1000 unidades de sinalizadores de faltas com especificações definidas no projeto de P&D anterior – “Desenvolvimento de Cabeça de Série do Sinalizador de Faltas – Incremento Tecnológico e Certificação”, instalar em campo os equipamentos fabricados para verificar seu potencial de uso e desenvolver uma metodologia para auxiliar na localização estratégica dos pontos de instalação desses equipamentos.

A fabricação e teste do lote piloto de sinalizadores são responsabilidades da Expertec e FDTE, enquanto que a CLCTEC é responsável pelo desenvolvimento da metodologia de otimização, cujo objetivo é definir estratégias ótimas de alocação de sinalizadores de faltas para atingir metas de confiabilidade com o menor investimento possível.

II. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O problema de alocação de sinalizadores luminosos de faltas (PASF) pode ser caracterizado como um problema combinatório na forma $\min\{cx : x \in S\}$, sendo S um conjunto discreto [4]. Em particular, o PASF pode ser formulado como um problema de programação linear inteira com variáveis binárias no formato $\min\{cx : Ax \leq b, x \in B^n\}$ definindo S como um conjunto de vetores inteiros n -dimensionais binários (sendo, $x_i \in \{0,1\}$ para $i = 1 \dots n$) que satisfaçam restrições lineares do tipo $Ax \leq b$, sendo A uma matriz $m \times n$ e b um vetor n -dimensional. Essa classe de problemas é tipicamente difícil de resolver, exigindo técnicas bastante elaboradas para encontrar soluções ótimas exatas ou metaheurísticas eficientes na exploração do espaço de soluções para encontrar soluções aceitáveis [5].

A formulação PASF em redes de distribuição de energia elétrica é detalhada nos próximos itens.

A. Representação da Rede de Distribuição

Para caracterizar formalmente o PASF é conveniente representar a rede de distribuição por meio de uma estrutura de grafos [6]. Um grafo $G = [N, A]$ é um objeto matemático definido por um conjunto de nós, N , e um conjunto de arcos, A . Pode-se observar que a associação entre um unifilar mostrado na Figura 1 e sua representação em grafo apresentada na Figura 2 é bastante intuitiva.

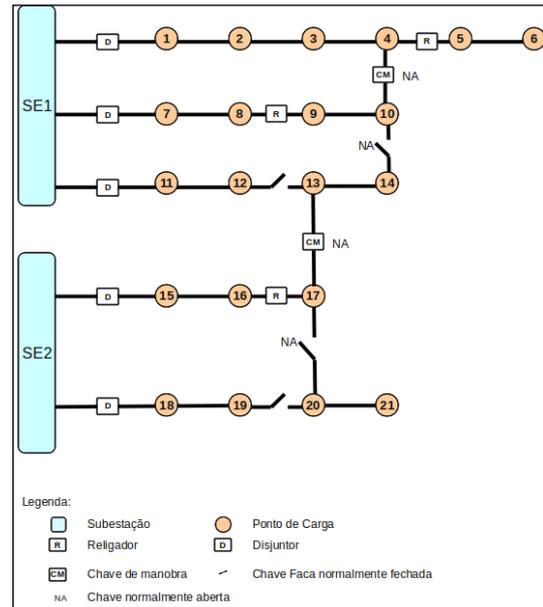


Figura 1. Unifilar de rede de distribuição

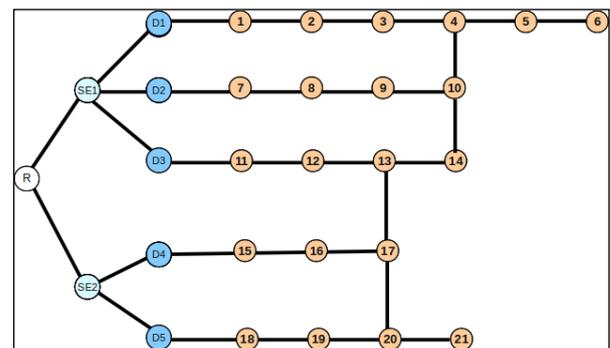


Figura 2. Representação em grafo do unifilar da Figura 1.

No grafo mostrado na Figura 2, os nós (representados por círculos) são associados às subestações e pontos de carga. Note que neste grafo é incluído um nó artificial raiz, R , conectando as subestações. Esse procedimento auxilia no tratamento da rede, evitando problemas de conectividade. Os arcos (representados por segmentos de retas ligando dois nós) estão associados às chaves e trechos de rede, exceção feita aos arcos que ligam os nós de subestações ao nó raiz, que podem ser associados aos subsistemas de transmissão. Pode-se também associar a cada arco o estado da chave (aberta ou fechada), como mostra a Figura 3. Nesta figura os arcos desenhados com linhas cheias representam as chaves fechadas e aqueles desenhados com linhas tracejadas as cha-

ves abertas.

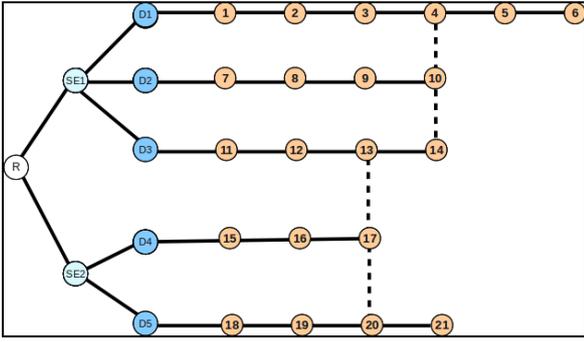


Figura 3. Representação da rede em operação por uma árvore do grafo mostrado na figura 2.

Nota-se na Figura 3 que a rede de distribuição é operada de forma radial. Essa forma de operação pode ser representada por uma árvore $T = [N, A']$ do grafo G , sendo $A' \subseteq A$ – uma árvore é um grafo conectado sem ciclos [6].

B. Formulação Matemática

A formulação matemática é baseada na representação da rede de distribuição por um grafo $G = [N, A]$, sendo:

N : conjunto de nós (pontos) do grafo G ;

A : conjunto de arcos (trechos) do grafo G ;

$|A|$: número de arcos no grafo G ;

$|N|$: número de nós no grafo G ;

Suc_i : conjunto de nós sucessores ao nó i .

Não existindo uma fonte alternativa de energia elétrica, a abertura de qualquer chave $(k-1, k)$ causará a interrupção no fornecimento de todos os pontos de carga à jusante (sucessores à chave aberta) desta chave, portanto, a carga interrompida pode ser calculada pela equação (1).

$$L_k = \sum_{i \in Suc_k} P_i. \quad (1)$$

Quando ocorre um defeito no trecho i de um alimentador, o dispositivo de proteção, localizado à montante do trecho com defeito, ao ser acionado isola a parte da rede com defeito. Após o tempo para localização do trecho de rede com defeito, td_i , a chave seccionadora (se existir) à montante do trecho i , CF_i , é aberta e o dispositivo de proteção acionado é fechado. Durante o tempo de reparo, τ_i , os trechos à jusante da chave CF_i ficam desenergizados. Assim, a energia não fornecida anual devido a falhas ocorridas no trecho i , e_i , pode ser calculada pela equação (2).

$$e_i = \lambda_i (td_i L_{DR_i} + \tau_i L_{CF_i}), \quad (2)$$

sendo:

λ_i : taxa de falha anual do trecho i ;

L_{DR_i} : fluxo de carga no dispositivo de proteção acionado à montante do trecho i ;

td_i : tempo para localização do defeito ocorrido no trecho i ;

τ_i : tempo de reparo do defeito ocorrido no trecho i ;

L_{CF_i} : fluxo de carga à montante da chave seccionadora fonte do trecho i .

Calculada a energia não fornecida anual devido a defeitos ocorridos em trechos da rede, pode-se calcular a energia anual não distribuída para o alimentador j , END_j , utilizando a equação (3).

$$END_j = \sum_{i=1}^{|A_j|} e_i = \sum_{i=1}^{|A_j|} (TMD_i L_{DR_i} + TME_i L_{CF_i}). \quad (3)$$

Na equação (3), $|A_j|$ é número de trechos do alimentador j , $TMD_i = \lambda_i td_i$ o tempo médio anual de localização de falhas no trecho i e $TME_i = \lambda_i \tau_i$ o tempo médio anual para reparar o defeito ocorrido no trecho i . Observe que a segunda parcela de (3) pode ser considerada constante, pois a instalação de DSF não altera o TME do trecho com defeito. Portanto, no PASF será considerada apenas a energia não distribuída devido ao TMD, calculada pela equação (4).

$$END_j = \sum_{i=1}^{|A_j|} TMD_i L_{DR_i} \quad (4)$$

A redução do TMD pode ser atingida instalando-se DSF em locais estrategicamente escolhidos ao longo do alimentador primário da rede de distribuição. Essa redução está associada ao tempo gasto na localização de defeitos na rede na presença de contingências na rede.

O tempo médio de localização do defeito é proporcional à distância percorrida pelas equipes de manutenção até a identificação do trecho com defeito, neste trabalho considera-se que as equipes partem da subestação que tem início o alimentador. Na existência de um defeito no trecho i , o tempo médio de localização, td_i , pode ser calculado pela equação:

$$td_i = \alpha_u du_i + \alpha_r dr_i, \quad (5)$$

sendo:

td_i : tempo médio de localização de defeitos ocorridos no trecho i em horas;

α_u, α_r : constante de proporcionalidade entre o tempo de localização e a distância percorrida para localizar defeitos em trechos urbanos e rurais, respectivamente – por exemplo, a velocidade média desenvolvida pelos veículos utilizados pela equipe de manutenção em trechos urbanos e rurais;

du_i, dr_i : distância média percorrida em km pela equipe de manutenção em áreas urbanas e rurais, respectivamente, para localizar defeitos ocorridos no trecho i .

Seja Δ_i a redução do tempo devido à instalação de DSF no nó i , o tempo médio de localização do defeito no trecho i pode ser calculado pela equação (6).

$$td_i' = td_i - \Delta_i. \quad (6)$$

Para definir o valor de Δ_i considera-se os seguintes casos:

- Quando as falhas ocorrem à montante dos DSF, os ganhos obtidos são iguais ao somatório das distâncias à jusante dos pontos de instalação dos DSF;
- Quando as falhas ocorrem à jusante de um dos DSF instalados, os ganhos obtidos são iguais ao percentu-

al β aplicado no somatório das distâncias dos ramos existentes no percurso do ponto de instalação do DSF sinalizados até a subestação. Sendo β uma constante que representa o percentual médio de percurso no alimentador para localizar um defeito.

Portanto, os ganhos são obtidos pela equação (7).

$$\Delta_i = \begin{cases} \sum_{j \in S} \sum_{k \in Suc_j} l_k, & \text{para } i \text{ à montante do DSF} \\ \sum_{j \in D} (\beta \sum_{k \in Suc_j} l_k), & \text{para } i \text{ à jusante do DSF} \end{cases} \quad (7)$$

Sendo:

Δ_i : ganho obtido na ocorrência de falha no arco i ;

l_k : comprimento do trecho k ;

Suc_j : conjunto dos arcos sucessores ao nó j ;

S : conjunto dos nós pertencentes ao caminho à jusante dos pontos de instalação dos DSF;

D : conjunto dos nós pertencentes ao caminho do ponto de instalação do DSF até a subestação;

β : percentual médio de percurso no alimentador para localizar um defeito.

A energia anual não distribuída devido à falha no trecho i pode ser calculada pela equação (8).

$$e'_i = \lambda_i ((td_i - x_i (\alpha_u \Delta U_i + \alpha_r \Delta R_i)) L_{DP_i} + \tau_i L_{CF_i}), \quad (8)$$

sendo a variável binária x_i associada a existência ou não de DSF no trecho i , ΔU_i e ΔR_i ganhos obtidos nas áreas urbanas e rurais, respectivamente. Como mencionando anteriormente, pode-se desprezar na (8) a parcela referente ao TME. Assim, a redução total da END para o alimentador j pode então ser calculada pela equação (9).

$$\Delta END_j = \sum_{i=1}^{|A_j|} \lambda_i (td_i - x_i (\alpha_u \Delta U_i + \alpha_r \Delta R_i)) L_{DP_i}. \quad (9)$$

Portanto, a energia total não distribuída no alimentador j devido à instalação de DSF é calculada pela equação (10).

$$END'_j = END_j - \Delta END_j \quad (10)$$

O modelo de otimização para alocação de sinalizadores luminosos de faltas é definido pelas equações (11) a (16) mostradas a seguir.

$$\text{Minimizar} \quad \varphi \sum_{j=1}^{NA} \sum_{i=1}^{|A_j|} END'_j + C_{DSF} \sum_{i=1}^{|N|} y_i \quad (11)$$

$$\text{sujeito à} \quad \sum_{i=1}^{|A_j|} TMD_i \leq TMDR_j, \text{ para } \forall j = 1 \dots NA \quad (12)$$

$$C_{DSF} \sum_{i=1}^{|N|} y_i \leq \text{InvestimentoMax} \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^{|N|} y_i \leq \text{NumDSF} \quad (14)$$

$$x_i \in \{0,1\}, \text{ para } \forall i = 1 \dots A_j \text{ e } \forall j = 1 \dots NA \quad (15)$$

$$y_i \geq 0, \text{ para } i = 1 \dots |N| \quad (16)$$

Sendo no modelo:

NA : número de alimentadores;

N : conjunto de pontos na rede de distribuição;

A : conjunto de trechos na rede de distribuição;

$|A|$: número de trechos na rede de distribuição;

$|N|$: número de pontos na rede de distribuição;

$|A_j|$: número de trechos no alimentador j ;

φ : valor médio da energia (R\$/MWh);

λ_i : taxa de falha anual do trecho i ;

td_i : tempo médio de localização de defeitos ocorridos no trecho i em horas;

LP_i : fluxo de carga no dispositivo de proteção acionado a montante do trecho i ;

α_u, α_r : constante de proporcionalidade entre o tempo de localização e a distância percorrida para localizar defeitos em trechos urbanos e rurais, respectivamente;

$\Delta U_i, \Delta R_i$: ganhos obtidos nas áreas urbanas e rurais, respectivamente, devido à ocorrência de falhas no trecho i em km;

C_{DSF} : custo de um conjunto de DSF em R\$;

x_i : variável binária associada à existência, ou não, de DSF a montante ou a jusante do trecho i ;

y_i : variável definindo a quantidade de DSF instalados no ponto de rede i ;

TMD_i : tempo médio anual de localização de falhas no trecho i em horas;

$TMDR_j$: tempo médio anual de localização de falhas para o alimentador j em horas;

InvestimentoMAX : Valor anual limite para o investimento em DSF em R\$;

NumDSF : valor limite para o número de conjuntos de DSF a serem instalados no ano de planejamento.

III. ALGORITMOS GENÉTICOS

Os algoritmos genéticos simulam o processo de evolução natural. São baseados na teoria evolucionista de Charles Robert Darwin (1859) [7]. Os princípios básicos desses algoritmos foram formalizados, inicialmente, por John H. Holland [8] e ao longo do tempo desenvolvidos [9][10] e aplicados na solução de vários problemas [11][12].

Na representação computacional dos algoritmos genéticos utiliza-se uma terminologia específica. As soluções do problema são associadas aos cromossomos dos indivíduos de uma população. Os cromossomos são constituídos por uma cadeia de *genes* que codifica uma possível solução. Essa codificação é definida especificando os valores possíveis (*alelos*) para cada uma das posições (*locus*) do cromossomo, organizando os *genes* numa estrutura adequada ao problema.

Cada indivíduo pode ser observado sob dois aspectos, pe-

lo seu código genético, o *genótipo*, e suas expressões comportamentais, o *fenótipo* [13]. O genótipo fornece um mecanismo para armazenar informações hereditárias dos indivíduos e o fenótipo as condições ambientais baseados na estrutura básica do genótipo. Normalmente, uma função para o mapeamento entre os genes do genótipo e as características do fenótipo deve ser definida para simular esse relacionamento.

A adaptação de cada indivíduo ao ambiente é medida por uma função de avaliação, ou *fitness*. É usual, em problemas de otimização, associar-se o *fitness* à função objetivo do problema. A Figura 4 mostra o pseudocódigo de um algoritmo genético básico.

```

Algoritmo Genético
t ← 0;
IniciaPopulação P(t);
AvaliaPopulaçãoP(t);
Enqto critério de parada não for satisfeito faça
  Seleciona indivíduos de P(t);
  Recombina indivíduos selecionados gerando descendentes;
  Realiza mutação nos indivíduos descendente;
  Atualiza a população P(t+1) a partir da população P(t);
  t ← t + 1;

```

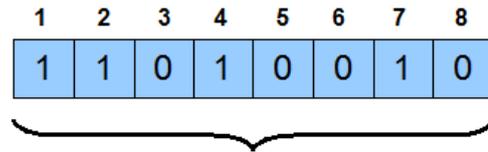
Figura 4. Pseudo-código de um algoritmo genético básico

Sendo, t é o número de gerações (iterações) do algoritmo, iniciando com o valor 0.

Após a população $P(t)$ ser inicializada (usualmente com valores randômicos), cada um dos indivíduos é avaliado calculando seu *fitness*. Alguns indivíduos selecionados são submetidos à recombinação gerando descendentes, ou seja, novas soluções para o problema. Os descendentes são submetidos a pequenas alterações (mutação) em seus genes, buscando melhorar o seu *fitness*. Os descendentes são avaliados, e uma nova população é preparada para a iteração seguinte, selecionando os indivíduos mais adaptados, aqueles com melhor *fitness*. Após um determinado número de gerações, o critério de parada é atingido, apresentando o indivíduo da população com melhor valor de *fitness*, uma solução aceitável para o problema.

IV. ALGORITMO GENÉTICO PARA ALOCAÇÃO DE SINALIZADORES DE FALTAS (AG-PASF)

A metodologia de alocação de dispositivos sinalizadores de falta (DSF) foi baseada na metaheurística de *Algoritmos Genético*. Sua representação genética é bem intuitiva, as soluções são codificadas em um cromossomo binário indicando os locais candidatos a receber os DSF, conforme mostra a Figura 5. Nesta figura apresenta-se um exemplo de solução do PASF para um alimentador com oito pontos possíveis de alocação dos DSF. Neste exemplo, os DSF foram instalados apenas nos pontos 1, 2, 4 e 7.



Locais possíveis para instalação dos DSF

Figura 5. Codificação do cromossomo para o PASF.

A população utilizada neste trabalho possui a característica particular de possuir uma estrutura hierárquica. Esse tipo de estrutura organiza os indivíduos em uma árvore *n-ária*, com k níveis. A Figura 6 ilustra uma árvore ternária com três níveis. A estrutura mostrada pode ser considerada como um conjunto de quatro agrupamentos, cada um composto de um líder e três indivíduos de suporte. Nesta hierarquia, os indivíduos nos níveis mais altos estão mais bem adaptados à população, ou seja, possuem valores de *fitness* maiores. Como consequência, a melhor solução é sempre colocada no nó raiz da árvore da população.

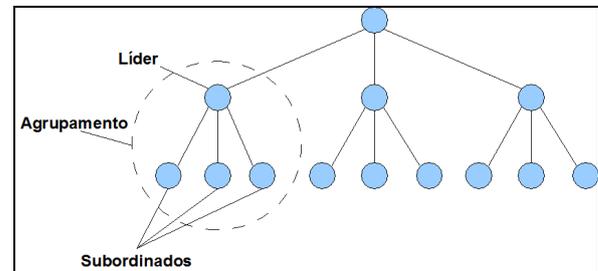


Figura 6. População estruturada composta de agrupamentos, cada um com um líder e três subordinados.

A população inicial é criada randomicamente, respeitando o limite máximo de sinalizadores a serem instalados no alimentador.

Na seleção de indivíduos para recombinação, seleciona-se um líder randomicamente com distribuição uniforme. Em seguida, um dos três suportes é escolhido também randomicamente seguindo uma distribuição uniforme.

A recombinação dos indivíduos selecionados segue o critério uniforme [9]. Neste critério, cada uma das posições dos cromossomos pais é percorrida e o alelo do cromossomo descendente correspondente a essa posição é escolhido aleatoriamente de um dos cromossomos pais. O operador recombinação retorna um novo indivíduo – o descendente.

A mutação do descendente adiciona diversidade à população de indivíduos. A mutação é aplicada a 10% dos descendentes. Em geral, taxas de mutações altas devem ser evitadas porque podem introduzir ruído ao processo evolucionário, eliminando as características boas existentes nos cromossomos.

Cada novo indivíduo pode substituir o líder de seus pais – líder do agrupamento e indivíduos suporte – dependendo se seu *fitness* é melhor ou não que de seus pais. Se o indivíduo gerado é pior que seus pais, ele é descartado. Após todos os indivíduos serem gerados, e inseridos ou descartados, o algoritmo inicia a atualização da população estruturada, verificando se os melhores indivíduos estão na posição de líder na hierarquia. Caso não estejam, promove-se troca de posições dos indivíduos envolvidos.

A função de avaliação tem a finalidade de medir a “qualidade” dos indivíduos gerados. Para tanto, ela deve guardar uma relação estreita com a função objetivo do problema em questão. Restrições conjecturais, não necessariamente associadas à formulação clássica do problema, podem também serem associadas à função de avaliação; em particular, discute-se a inclusão de uma restrição de limitação do orçamento.

A metodologia de alocação dos sinalizadores de faltas é realizada para cada alimentador separadamente. Portanto, a cada simulação de instalação de sinalizadores de faltas em um alimentador os demais são mantidos inalterados. Essa decomposição da rede elétrica é possível porque sua operação é radial, assegurando que as alterações provocadas pela instalação de sinalizadores de faltas não acarretam em mudanças no TMD dos outros alimentadores, e a probabilidade de falhas simultâneas em diferentes trechos da rede é extremamente pequena [14]. Dessa forma, o processo de otimização pode ser conduzido sequencialmente e independente para cada alimentador, reduzindo a dimensão do problema matemático e, conseqüentemente, seu tempo computacional.

V. SISTEMA DE APOIO À DECISÃO

O sistema de apoio à decisão *Alocasin* compreende os módulos *Alocasin-Desktop* e o *Alocasin-Otimizador*. O módulo *Alocasin-Otimizador* executa o AG-PASF para alocação dos sinalizadores de falta, conforme descrito na Seção IV. A comunicação entre o usuário e o módulo de otimização é realizada pelo *Alocasin-Desktop*. Esse módulo é responsável pela formatação da chamada para a execução do módulo *Alocasin-Otimizador* e a apresentação dos seus resultados, utilizando uma interface gráfica e intuitiva, conforme descrita nesta seção.

As principais funções do *Alocasin-Desktop* são listadas a seguir.

- Visualização gráfica dos dados da rede de distribuição;
- Funções de afastamento e aproximação do unifilar da rede;
- Edição dos parâmetros para a simulação;
- Avaliação de alocações de sinalizadores luminosos de faltas previamente elaboradas;
- Seleção de alimentadores a serem simulados;
- Inclusão de sinalizadores luminosos de faltas existentes e novos para serem considerados na simulação.

A Figura 7 mostra a janela principal do *software Alocasin*. Nesta janela é mostrada a barra de menu que guia o usuário às funcionalidades do *Alocasin*. Ela foi projetada para acompanhar os passos necessários à elaboração de cenários de alocação de sinalizadores luminosos de faltas. São eles:

Etapa1. Ler o arquivo com os dados da rede a ser simulada;

Etapa2. Definir os parâmetros para a simulação do cenário desejado;

Etapa 3. Simular a alocação dos sinalizadores de faltas, utilizando o AG_PASF para obter soluções otimizadas;

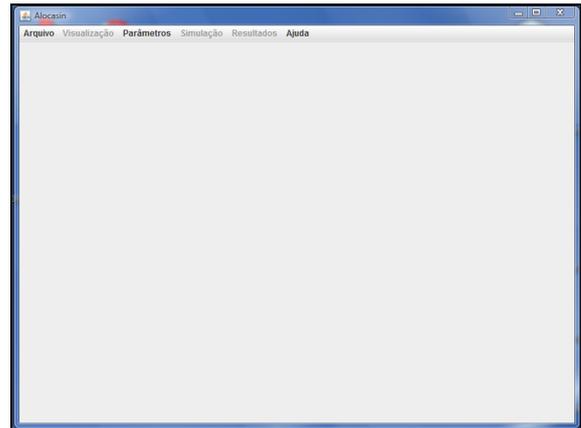


Figura 7. Janela principal do Alocasin.

Etapa 4. Verificar os resultados obtidos pelo Algoritmo Genético.

Observe na Figura 7 que os itens da barra de menus *Visualização*, *Simulação* e *Resultados* não estão habilitados (desenhados na cor cinza claro), pois estes itens dependem da leitura de um arquivo contendo os dados da rede para que possam executar adequadamente suas funções.

No item de menu *Arquivo*, é possível selecionar o arquivo com os dados da rede para a simulação. Após a escolha e leitura do arquivo, o desenho do unifilar da rede é apresentado, como mostra a Figura 8. Nesta figura os alimentadores são desenhados em cores diferentes para melhor visualização. Observe também que as opções *Visualização*, *Simulação* e *Resultados* estão agora habilitadas (desenhadas na cor preta) permitindo sua escolha.

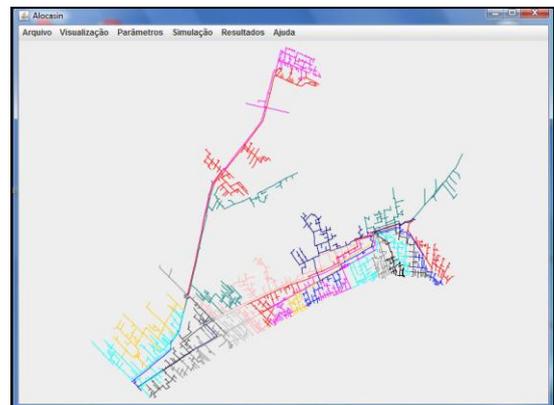


Figura 8. Desenho do unifilar da rede a ser simulada.

Selecionando a opção de menu *Parâmetros* é possível alterar e gravar os parâmetros de simulação custo da energia (R\$/MWh), fator de carga, juros anuais, taxa de amortização, limites de investimentos, número máximo de sinalizadores luminosos de faltas a serem instalados, velocidade média da equipe de manutenção quando na procura do defeito na rede, percentual mínimo de busca na rede e taxa de falhas por quilometro de rede. Os valores gravados para estes parâmetros são utilizados na simulação.

O item de menu *Simulação* tem duas opções: *Avaliar Solução* e *Executar Otimizador*. A opção *Avaliar Solução* permite selecionar um arquivo com dados sobre a localiza-

ção dos sinalizadores de faltas para que o programa avalie a solução apresentada, isto é, calcule o custo da solução e o ganho percentual. Ao selecionar a opção *Executar Otimizador* pode-se ainda optar por simular todos os alimentadores ou selecionar aqueles alimentadores desejados para a simulação. É possível também incluir dados de sinalizadores existentes ou sinalizadores não existentes que o usuário determine sua localização e deva ser considerados. A Figura 9 ilustra a apresentação dos resultados da simulação, onde os quadrados na cor verde mostram a localização dos sinalizadores luminosos de falta.

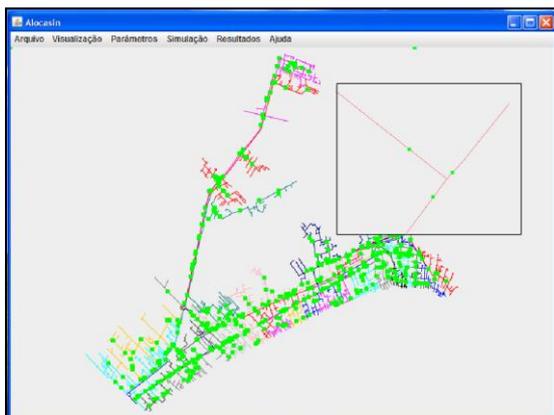


Figura 9. Janela do *AlocaSin* mostrando o resultado da simulação.

Os resultados das simulações na forma texto podem ser verificados e gravados usando o item de menu *Resultados*.

VI. ESTUDOS DE CASOS

Nesta seção detalham-se os estudos de casos elaborados com a utilização do *AlocaSin-Otimizador*. Após apresentar o método utilizado neste projeto para ajustar os parâmetros do AG, são mostrados os resultados dos estudos de casos das redes de Ferras Sales, Brotas e Itacolomi. Para todos esses estudos de casos foram utilizados os valores de velocidade média de deslocamento da equipe de manutenção, percentual média da rede a ser inspecionada pela equipe de manutenção e taxa de falha média por quilometro de rede iguais a 5 km/h, 10% e 1%, respectivamente.

A. Ajustes dos Parâmetros do AG-PASF

A convergência dos *Algoritmos Genéticos* (AG) depende de ajustes nos parâmetros: tamanho da população, taxa de recombinação e taxa de mutação. Para auxiliar o ajuste desses parâmetros foi utilizado o procedimento computacional similar ao proposto por Mendes [15]. Esse procedimento inicia atribuindo valores randômicos aos parâmetros taxa de recombinação e taxa de mutação. Em seguida, desenvolve um processo iterativo incluindo três laços. No primeiro laço executa-se o AG variando o tamanho da população e mantendo fixos os parâmetros taxa de recombinação e mutação. O tamanho da população que levou ao melhor resultado do AG é armazenado para ser utilizado no laço seguinte. O segundo laço mantém fixo o tamanho da população e taxa de mutação, variando a taxa de recombinação. A taxa de recombinação associada ao melhor resultado do AG é também

armazenada para ser utilizada no terceiro laço, juntamente com o tamanho da população definido no primeiro laço. O último laço, terceiro do processo iterativo, é executado variando a taxa de mutação e mantendo-se fixo o tamanho da população e a taxa de recombinação. A taxa de mutação que induz à melhor solução do AG é também armazenada juntamente com os demais parâmetros, tamanho da população e taxa de recombinação. Esse processo se repete até que não seja observadas alterações nos parâmetros definidos na iteração anterior.

No ajuste dos parâmetros do AG_PASF foram utilizados os seguintes intervalos de variação para os parâmetros estudados:

Tamanho da População: 13, 40 e 120 indivíduos;

Taxa de Recombinação: de 0 a 100% em incrementos de 10%;

Taxa de Mutação: de 0 a 100%, em incrementos de 10%.

Foram selecionados cinco alimentadores para o ajuste dos parâmetros, sendo 3 de Pedro Taques (PTA35, PTA36 e PTA40), 1 de Paria Grande (PRG39) e 1 Ferraz Sales (FSA01). A tabela I mostra os resultados obtidos nas simulações.

Tabela I. Resultados das simulações para ajuste dos parâmetros.

Alimentador	Número de Indivíduos	Taxa de Recombinação (%)	Taxa de Mutação (%)	Melhor Valor (R\$)
PTA35	13	50	100	21.015,90
PTA36	13	80	50	30.929,20
PTA40	13	30	50	24.928,40
PGR39	13	90	100	11.360,60
FSA01	13	50	50	41.761,00

Observa-se na tabela I que para todos os alimentadores a população com 13 indivíduos obteve os melhores resultados, valor adotado nos estudos de casos. A taxa de recombinação variou entre os valores de 30 a 90, nos estudos de casos adotou-se o valor médio de 60, buscando o compromisso entre bons resultados entre alimentadores diferentes. A taxa de mutação adotada para os estudos de casos foi 10% para manter equilibrada a diversificação dos indivíduos da população, abandonando-se os valores sugeridos pelo algoritmo de ajuste – considerou-se muito alto o valor sugerido para ser aplicado na prática dos estudos de casos. Esse resultado será objeto de estudo em trabalhos futuros.

B. Estudos de Casos

As redes de Ferraz Sales, Brotas e Itacolomi foram utilizadas nos estudos de casos para verificar o comportamento da metodologia desenvolvida. Os parâmetros usados nas simulações foram:

- Velocidade da equipe de manutenção: 5 km/h;
- Percentual médio de da rede a ser examinada pela equipe de manutenção: 10%;
- Taxa de falha do alimentador: 1%.

A tabela II resume os resultados obtidos nos estudos de casos e as Figura 10, Figura 11 e Figura 12 mostram a loca-

lização dos sinalizadores propostos para as redes de Ferraz Sales, Brotas e Itacolomi, respectivamente.

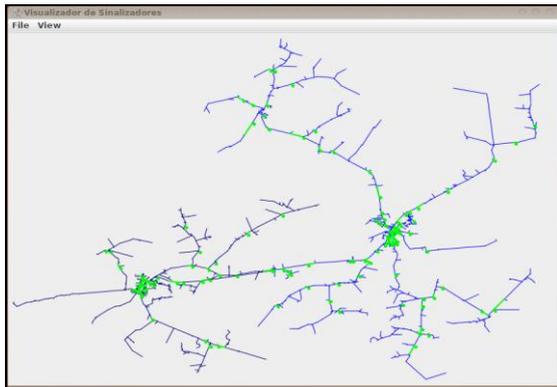


Figura 10. Localização dos sinalizadores de faltas na rede Ferraz Sales.

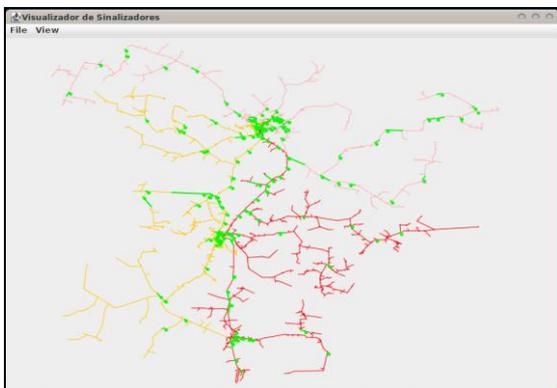


Figura 11. Localização dos sinalizadores de faltas na rede Brotas.

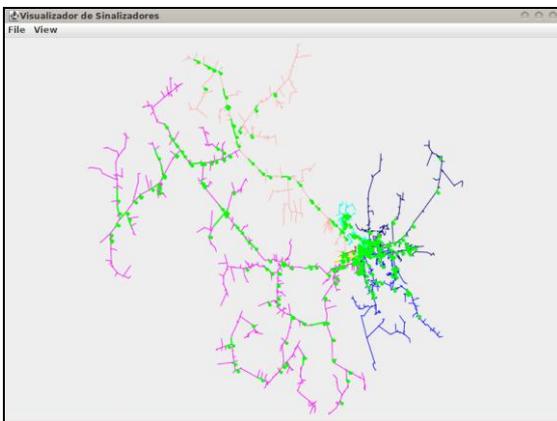


Figura 12. Localização dos sinalizadores de faltas na rede Itacolomi.

Na tabela II, o ganho indica o percentual de redução da energia não distribuída obtida pela colocação dos DSF. Observe nesta tabela que a média de ganho pela instalação dos sinalizadores propostos é aproximadamente 66%, valor significativo indicando reduções promissoras no DEC da empresa. Considerando os valores relativos do Custo da END e os ganhos obtidos, pode-se estabelecer um plano de investimentos priorizando os alimentadores com possibilidade de maiores benefícios.

Tabela II. Resultados das simulações dos estudos de casos.

Rede	Ganho (%)	Sinalizadores Propostos	Total de Sinalizadores	Tempo de Processamento
Ferraz Sales			155	0:35:42,95
FSA02	82,03	98		
FSA01	79,97	57		
Brotas			203	0:54:18,22
BRN23	76,97	67		
BRN24	77,97	53		
BRN22	81,41	83		
Itacolomi			350	0:54:18,22
ITC03	79,57	62		
ITC04	76,23	51		
ITC05	55,84	57		
ITC06	79,21	132		
MT001	14,79	1		
MT002	52,34	38		
MT003	43,44	9		
Média		66,47/alim		11min/alim

VII. COMENTÁRIOS FINAIS

Este artigo apresenta a metodologia de alocação de sinalizadores luminosos de faltas em redes de distribuição de energia elétrica, desenvolvida como parte do projeto de P&D LP02 - Lote Pioneiro e Inserção no Mercado do Sinalizador de Faltas Luminoso – código ANELL PD-0063-0002/2009.

O problema de alocação dos sinalizadores é caracterizado como um problema de programação linear inteira e formulado para minimizar o benefício obtido pela instalação de sinalizadores na rede. O benefício é medido pelo compromisso entre a energia não distribuída e os custos dos sinalizadores luminosos de faltas. Suas restrições incluem limites de TMD, investimentos e número de sinalizadores a serem instalados.

Algoritmos Genéticos foi a técnica aplicada para a solução do problema de otimização formulado. As soluções do problema são codificadas em um cromossomo binário indicando a existência ou não de sinalizadores nos locais candidatos a receber os DSF. A função de avaliação foi associada à função objetivo, medindo o benefício obtido pela alocação dos DSF.

A aplicação da metodologia desenvolvida no projeto foi avaliada por meio da simulação de 12 alimentadores selecionados do sistema de distribuição da CPFL. Os resultados obtidos mostram claramente os benefícios da melhora da confiabilidade do sistema, em particular devido a significativas reduções no TMA, indicando a possibilidade de aplicação da metodologia em uma área piloto das empresas do grupo CPFL.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. J. Krajnak, "Faulted circuit indicators and system reliability", in *Rural Electric Conference*, Louisville, KY, USA, 2000, pp. A4/1-A4/4.
- [2] D. M. B. S. de Souza, A. F. de Assis, e I. N. da Silva, "Efficient fuzzy approach for allocating fault indicators in power distribution lines", in *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 2008 IEEE/PES.

- [3] D.-P. Cong, B. Raison, J.-P. Rognon, S. Bonnoit e B. Manjal, "Optimization of fault indicators placement with dispersed generation insertion", in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Vol. 1, 2005, pp. 355-362.
- [4] G. L. Nemhauser e L. A. Wolsey, *Integer and Combinatorial Optimization*. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [5] M. R. Garey e D. S. Johnson, *Computers and Intractability. A Guide to the Theory of NP-Completeness*. New York: W. H. Freeman and Company, 1979.
- [6] R. K. Ahuja, T. L. Magnanti e J. B. Orlin. *Network Flows. Theory, Algorithms, and Applications*. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
- [7] C. Darwin, *On the origin of species: by mean of natural selection*. New York: Dover Publications, 2006.
- [8] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Massachusetts: The University of Michigan Press, 1975
- [9] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, New York: Addison-Wesley, 1989.
- [10] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Third Edition, Berlin: Springer, 1996.
- [11] A. Mendes, P. M. França, C. Lyra, C. Pissarra e C. Cavellucci, "An evolutionary approach for capacitor placement in distribution networks", in *Proceedings of Third International NAISO Symposium on Engineering of Intelligent Systems, Natural and Artificial Intelligence Systems Organizations (NAISO)*, Malaga, Spain, 2002.
- [12] D. Beasley, *Possible applications of evolutionary computation, in Evolutionary Computation: Basic Algorithms and Operators*, New York: Taylor & Francis Group, 2000, Chapter 2, pp. 4-19.
- [13] D. B. Fogel, "A introduction to simulated evolutionary optimization", *IEEE Transaction on Neural Network*, 5(1), pp 3-14, 1994.
- [14] G. Levitin, S. Mazal-Tov e D. Elmakis, "Genetic algorithm for optimal sectionalizing, in radial distribution system with alternative supply", *Electric Power Systems Research*, 35, pp. 145-155, 1995.
- [15] A. S. Mendes, "Algoritmos Meméticos Aplicados aos Problemas de Sequenciamento em Máquinas", *Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, UNICAMP*, 1999.