

Optimization of Reliability through Switch Reconfiguration in Distribution Systems

F. Rodrigues, L. Araujo, *Senior Member, IEEE*, and D. Penido, *Senior Member, IEEE*

Abstract—This paper presents a method for optimization of costs associated with reliability in radial distribution systems through switch placement using genetic algorithms. An analysis of how the results are impacted by restrictions on the possibilities of allocating switches in one or both ends of each section of the feeder is done. Optimized switch locations are defined to improve restoration and reduce costs associated with reliability. Simulations in real feeders are performed, and the results presented show significant improvements for all tested feeders.

Index Terms—Distribution systems, Reliability, FEC, DEC, SAIFI, SAIDI, Optimization, Genetic algorithms.

I. INTRODUÇÃO

O CONTROLE dos índices de confiabilidade em uma rede de distribuição é uma das grandes preocupações atuais do setor de energia elétrica [1]-[2], devido à sua relação direta com o custo e a qualidade da energia elétrica ofertada aos diversos consumidores residenciais, comerciais ou industriais. Além do fato de as redes de distribuição estarem constantemente suscetíveis a faltas [3], das mais diversas origens, nota-se a crescente exigência por energia mais confiável, devido à grande necessidade por esta energia, seja por conforto, para produção, e devido à sensibilidade das cargas conectadas à rede. Deste modo, nota-se que têm sido feitas constantes buscas por melhores métodos de configuração de redes de distribuição e por métodos mais eficientes de proteção dessas redes.

A instalação de chaves seccionadoras nos alimentadores, religadores e o uso de alimentadores com possibilidades de redundância consistem em métodos comuns de se aprimorar a confiabilidade de uma rede de distribuição, melhorando-se a qualidade da energia fornecida aos consumidores, como mostrado em [4]-[6]. Dessa forma, no caso de faltas, as concessionárias de energia podem modificar a topologia da rede através de chaveamentos, com o intuito de reduzir a duração da falta de energia nas unidades consumidoras, e o custo associado com energia não suprida e multas. Como a

instalação e a manutenção das chaves e outros equipamentos de proteção possuem custos associados, as companhias devem escolher cuidadosamente as seções dos alimentadores nas quais serão instalados estes dispositivos, na tentativa de minimizar o custo global de operação da rede.

Na tentativa de otimização da localização destes equipamentos tem-se uma tendência geral de que quanto maior a confiabilidade da rede, menores são os custos referentes a consumidores com fornecimento interrompido, mas maiores são os custos agregados à instalação de equipamentos e operação da rede, de modo que a análise das topologias ótimas das redes de distribuição de energia não é simples. A busca pela melhor solução econômica, levando em conta custos de confiabilidade e custos de interrupção, passa por um espaço de soluções candidatas que pode ser enorme, o que leva ao uso de métodos heurísticos para que se encontrem soluções otimizadas. Embora um método heurístico, por sua própria natureza, não possa garantir que o ótimo global seja encontrado, a eficiência, o tempo de simulação e o desempenho de seus ótimos localizados justificam seu uso.

Alguns métodos de otimização de redes radiais de distribuição já foram propostos [7]-[18]. Todos conduzem a soluções otimizadas que possuem grandes melhorias em relação a sistemas não-otimizados; porém, esses métodos pesquisados na literatura envolvem a análise de alocação de chaves seccionadoras apenas no começo de cada seção do alimentador, com isso não levando em conta a possibilidade de chaves ao final das seções (ou até mesmo em ambas as extremidades). Ao não levar em conta tal possibilidade, a busca pela melhor solução de localização de chaves é comprometida, porque numerosas possibilidades de manobras de restauração são ignoradas. Resultados semelhantes aos obtidos neste trabalho poderiam ser obtidos criando nós extras em algumas metodologias existentes para a representação das chaves extras, contudo o tempo computacional aumenta e este aumento de tempo impacta negativamente no uso de técnicas heurísticas que executam diversas vezes uma aplicação específica. Além disto, o modelo a quatro chaves (chaves no início e final do ramal) é uma nova visão sobre o problema e facilita a representação do problema em busca de melhores soluções.

Além disso, neste trabalho desenvolveu-se uma nova forma de calcular os índices e custos de confiabilidade das redes para realizar a otimização do custo de energia não suprida em função do índice de confiabilidade DIC, que, além de ser amplamente analisado e medido por concessionárias e agências reguladoras brasileiras, permite uma análise do custo

Este trabalho foi suportado em parte pelo CNPq, FAPEMIG, CAPES e INERGE.

F. M. Rodrigues, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil (e-mail: fabio.miranda@engenharia.ufjf.br).

D. R. R. Penido, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil (e-mail: debora.rosana@ufjf.edu.br).

L. R. Araujo, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil (e-mail: leandro.araujo@ufjf.edu.br).

individual de energia não suprida para cada consumidor conectado à rede, ao invés de um cálculo mais generalista feito a partir do índice global da rede o DEC. Considera-se também o custo das chaves que irão influenciar nas variações de custo de interrupção, desta forma otimizando-se o custo global do alimentado.

Assim, propõe-se neste trabalho um método de otimização multi-objetivo de custos de confiabilidade das redes. O caráter multi-objetivo refere-se ao fato de que o parâmetro a ser otimizado (no caso, a função de aptidão de um algoritmo genético) será composto por custos tanto de dispositivos seccionadores quanto de confiabilidade, o que conduzirá a uma otimização que vise a diminuição de custos totais e, possivelmente, melhorias também na confiabilidade do sistema. As soluções analisadas pelo algoritmo serão variadas tanto em relação ao posicionamento quanto à quantidade de chaves seccionadoras NF presentes, havendo possibilidade de se alocarem tais chaves em qualquer extremidade de cada seção do alimentador (ou até mesmo ambas), o que consiste numa novidade já que esta possibilidade não foi detectada na literatura pesquisada. Além disso, simulações serão feitas no intuito de se compararem diferentes restrições concernentes a este ponto, com análise e discussão crítica dos resultados.

II. ÍNDICES DE CONFIABILIDADE UTILIZADOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Nesta seção serão apresentados quatro índices de confiabilidade que serão utilizados na análise das soluções, conforme será explicado com mais detalhes nas seções posteriores. Esses índices, definidos em [1], são: FIC, DIC, FEC e DEC, sendo que índices análogos são utilizados em todo o mundo (na literatura internacional, por exemplo, costuma-se usar índices globais SAIFI e SAIDI, respectivamente, de forma semelhante a FEC DEC). Os índices FIC e DIC são indicadores individuais que devem ser apurados para todas as unidades consumidoras, e os índices FEC e DEC são indicadores coletivos que levam em consideração a rede como um todo. Tais índices são a seguir descritos:

FIC (*Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora*)

Corresponde ao número de interrupções da unidade consumidora considerada, no universo de todas as unidades consumidoras de uma rede de distribuição, logo é um valor que expressa o número de interrupções que tal ponto de carga experimenta no período de apuração, conforme (1):

$$FIC = n \quad (1)$$

Sendo: n = número de interrupções da unidade consumidora considerada, no período de apuração.

DIC (*Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora*)

Corresponde ao período de interrupção da unidade consumidora considerada, expresso em horas, no universo de todas as unidades consumidoras de uma rede de distribuição e é calculado conforme (2):

$$DIC = \sum_{i=1}^n t_i \quad (2)$$

i = índice de interrupções da unidade consumidora; t_i = tempo de duração da interrupção (i) da unidade consumidora considerada, no período de apuração.

FEC (*Frequência Equivalente de Interrupção*)

Aplicado a um conjunto de pontos de carga, o índice FEC expressa o número médio de vezes em que um consumidor conectado a qualquer um desses pontos de carga experimenta interrupção de fornecimento de energia, no período de apuração. Pode ser então estabelecido como sendo a média dos índices FIC de todos os consumidores desse sistema, conforme (3):

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{Cc} FIC_i}{Cc} \quad (3)$$

FIC_i : número de interrupções para uma unidade consumidora i no período de apuração; Cc : número total de unidades consumidoras faturadas do conjunto no período de apuração.

DEC (*Duração Equivalente de Interrupção*)

Aplicado a um conjunto de pontos de carga, o índice DEC expressa a quantidade média de horas que um consumidor conectado a qualquer um desses pontos de carga permanece interrompido devido a interrupções no fornecimento de energia, no período de apuração. Pode ser então estabelecido como sendo a média dos índices DIC de todos os consumidores desse sistema, conforme (4):

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{Cc} DIC_i}{Cc} \quad (4)$$

III. MÉTODO PROPOSTO PARA OTIMIZAÇÃO DE CUSTOS DE CONFIABILIDADE EM REDES RADIAIS

A. Formulação do Problema e Função de Aptidão

Para cada falta que ocorre numa rede de distribuição, uma sequência de eventos é desencadeada. Disjuntores, fusíveis ou religadores poderão atuar, em conjunto ou não com ações de manobra de chaves visando isolar as áreas de falta e, com isso, minimizar a quantidade de consumidores interrompidos. Esses fatores devem ser levados em conta no cálculo dos índices de confiabilidade da rede.

De forma a se trabalhar com uma otimização multi-objetivo que leve em conta não apenas a confiabilidade de uma rede, mas também os custos relacionados a essa confiabilidade, uma função de aptidão que mescle os aspectos tanto de confiabilidade quanto econômicos deve ser utilizada. Neste contexto, será definido neste trabalho o Custo Anual da Rede associado à sua Confiabilidade (CARC). O CARC deve considerar os parâmetros e equipamentos da rede que impactam simultaneamente em seus custos e em sua confiabilidade, o que inclui, além dos valores associados à

aquisição, manutenção e operação de equipamentos de proteção e manobra, a função de dano ao consumidor (FDC). Uma função de dano ao consumidor consiste num valor médio de unidade monetária associado ao período de uma unidade de tempo de interrupção de energia (normalmente medido em \$/kWh); em outras palavras, é a conversão de uma interrupção de fornecimento de energia em impacto financeiro médio sofrido pelos consumidores. Valores de FDC variam muito de acordo com o tipo de consumidor (residencial, industrial, comercial etc), localização do alimentador, dentre outras características, sendo usualmente medidos de acordo com pesquisas orientadas a consumidores e concessionárias. O uso de FDC em problemas de otimização de confiabilidade, bem como resultados de algumas pesquisas, pode ser encontrado na literatura, por exemplo, em [12] e [18].

Como o objetivo neste artigo é encontrar o posicionamento ótimo de instalação de chaves NF numa rede, para realizar a otimização de custos, pode-se assumir como fixos os custos de disjuntores e fusíveis, além de outros equipamentos, e inclusive de manutenção e operação. Desta forma, o CARC será calculado pela equação proposta em (5):

$$CARC = NumNF \cdot CusNF + \sum_{j=1}^n P_j \cdot FDC_j \cdot DIC_j \quad (5)$$

Sendo: $NumNF$: número de chaves NF alocadas no alimentador. É uma variável de cada alocação de chaves testada pelo algoritmo, já que diferentes alocações poderão ter diferentes números de chaves NF; $CusNF$: custo anual equivalente de uma chave, em \$, que associa a cada chave NF um custo médio anual que leva em conta aquisição e manutenção de uma chave (como utilizado em [12] e [18]). Este valor é inserido no algoritmo no conjunto de dados iniciais do alimentador a ser simulado;

n : número de pontos de carga conectados ao sistema. Este valor é inserido no algoritmo no conjunto de dados iniciais do alimentador a ser simulado;

P_j : carga (kW) conectada ao ponto de carga j . Este valor é inserido no algoritmo no conjunto de dados iniciais do alimentador a ser simulado;

DIC_j : valor do DIC do ponto de carga j . Os valores de DIC para cada consumidor j serão calculados pelo algoritmo seguindo os passos descritos no item C desta seção, e serão variáveis para cada solução do problema de alocação de chaves NF (já que diferenças na disposição de chaves NF no alimentador impacta as possíveis manobras de restauração de energia, com isso impactando as DIC_j referentes ao CARC da alocação avaliada pelo algoritmo);

FDC_j : função de dano do consumidor j , em \$/kW.h. Este valor é inserido no algoritmo no conjunto de dados iniciais do alimentador a ser simulado.

Portanto, no que tange a obtenção do CARC (que é a função que visa avaliar a aptidão econômica de cada possível solução da alocação de chaves NF no alimentador), reforça-se que as variáveis do problema serão $NumNF$ e DIC_j , variantes para cada alocação testada pelo algoritmo. Os demais valores que

compõem a equação (5) serão dados fixos do alimentador, isto é, dados que não variam de acordo com a alocação de chaves testada (custo de chaves, função de dano por hora, carga conectada, número de pontos consumidores).

B. Método de Otimização utilizando Algoritmo Genético

O método de otimização desenvolvido neste trabalho é baseado em algoritmos genéticos (optando-se pelo modelo conhecido como SGA - *Simple Genetic Algorithm*). O objetivo é encontrar o número e o local de instalação de chaves NF nos alimentadores analisados a fim de se minimizar o CARC da rede. O fluxograma do método é apresentado na Fig. 1.

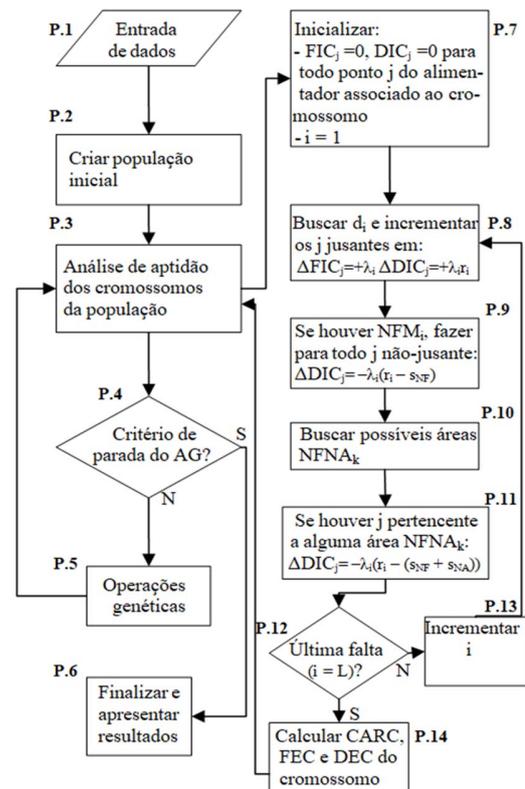


Fig. 1. Fluxograma do método desenvolvido.

Cada cromossomo é construído com genes que descreverão a existência (1) ou não (0) de chaves NF em cada seção entre dois nós do alimentador, e a sua posição entre tais nós (mais para perto do nó “de” ou do nó “para” da seção). Por exemplo, se determinado alimentador tiver 7 seções com 8 nós (numerados de 1 para 8) e duas chaves NF, uma instalada no início da seção 2-3 e outra instalada no fim da seção 3-5, o cromossomo que representa esta situação será o da Fig. 2. A variabilidade no número e no posicionamento de chaves NF num alimentador, expressa pelas combinações genéticas binárias num cromossomo desse tipo, gera soluções do problema de alocação de chaves que levam a custos e confiabilidades diferentes devido às diferentes possibilidades de manobras de restauração de energia em caso de faltas. Os custos e os índices de confiabilidade são quantificados para cada alimentador candidato com uma simulação analítica de faltas que será descrita no item C da seção III.

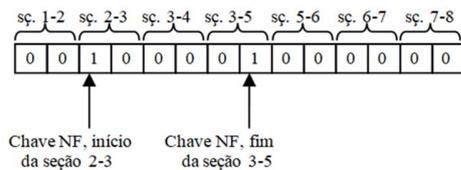


Fig. 2. Estrutura do cromossomo proposto (*sq – seção).

Já foi mencionada, ao se explicar a função de aptidão, alguns dados gerais sobre o alimentador a ser simulado que devem ser fornecidos ao algoritmo na etapa de entrada de dados **P.1**. Utilizando índices j para nós de consumidores e índices i para as seções entre os nós, o conjunto completo de dados do alimentador necessário contém, de forma consolidada: os nós j (com notação de “de” e “para” em cada seção entre dois nós, viabilizando a busca em grafo de equipamentos e pontos jusantes ou montantes entre si), a carga P_j conectada nos nós e o número de consumidores a eles conectados, a taxa anual de faltas λ_i de cada seção entre dois nós, o tempo médio de reparo r_i de cada falta, a função de dano a FDC_j referente a cada nó, o custo anual de uma chave NF, a localização de cada chave NA no alimentador, o tempo médio S_{NF} de manobra de uma chave NF e o tempo médio S_{NA} de manobra de transferência de carga por chave NA.

Baseando-se nos dados gerais do alimentador, o algoritmo genético gera uma população inicial de soluções candidatas em **P.2**, na forma já explicada de cromossomos binários. Essa população inicial contém indivíduos com número e posicionamento de chaves NF próprios, que terão suas aptidões avaliadas (**P.3**) de acordo com a função (5). Enquanto o critério de parada do algoritmo genético (referente ao passo **P.4**, e cujo parâmetro pode ser escolhido pelo usuário da forma que lhe convir, como número máximo de gerações ou estagnação) não for alcançado, os indivíduos da população passam por operações genéticas (**P.5**). Essas operações englobam cruzamentos (com recombinação de *crossover* em ponto único com escolha de pais por método da roleta de aptidões, características do *SGA*), mutação (por *bit-flip*) e elitismo, com taxas que podem ser escolhidas pelo usuário e variadas em diversas simulações. Tais operações geram novas populações (em tese) mais aptas. Quando enfim o critério de parada for satisfeito, o algoritmo genético é parado e os resultados são apresentados (**P.6**). Esses resultados englobam aptidão máxima, mínima e média de cada geração; cromossomo mais apto (quanto ao CARC); e CARC, FEC e DEC do cromossomo mais apto.

Finalmente, notar que, sendo o *SGA* por definição um algoritmo de maximização de uma função de aptidão, e em sendo o CARC uma aptidão que é tão melhor quanto mais minimizada, durante o processo de avaliação das aptidões dos cromossomos o algoritmo genético tomará o simétrico de cada solução candidata e procurará maximizar este valor. Isto levará a soluções cujas aptidões são tão melhores quanto menor o seu CARC, o que é o objetivo aqui.

C. Cálculo dos Índices de Confiabilidade Necessários para a Avaliação das Soluções

Serão apresentadas agora as rotinas seguidas pelo algoritmo

que possibilitam o cálculo do custo e índices de confiabilidade necessários à análise do problema. Estas rotinas são realizadas no cômputo da aptidão de cada cromossomo e referem-se aos passos de **P.7** a **P.14** do fluxograma.

Embora a função de aptidão (5), a rigor, só demande o cálculo dos índices individuais DIC de cada ponto consumidor j como meio de se avaliar o CARC de cada solução e com isso determinar a solução ótima, optar-se-á por se calcular também os outros índices de confiabilidade definidos na seção II. Isto será feito com o intuito de se complementar a análise de cada solução obtida pelo método, já que os índices FEC e DEC, em conjunto com o CARC, fornecerão um panorama de avaliação final melhor das soluções obtidas pelo algoritmo. De qualquer forma, a obtenção dos índices extras FEC e DEC é facilmente possibilitada pelas equações (3) e (4), uma vez que os valores de FIC e DIC de cada consumidor serão naturalmente calculados como parte integrante do processo de obtenção do CARC, conforme será visto nesta seção.

De modo a se calcularem os índices de confiabilidade supracitados, proceder-se-á a uma simulação analítica de faltas de cada solução candidata analisada pelo algoritmo. Cada falta de cada solução candidata possui suas respectivas respostas de esquemas de proteção e manobras de restauração disponíveis, devido ao diferente número e posicionamento de chaves NF nas seções do alimentador. Essa simulação analítica conduzirá à obtenção dos FIC_j e DIC_j de cada consumidor j presente em cada configuração candidata de alimentador. Tais índices individuais permitirão, por sua vez, o cálculo de CARC, FEC e DEC dessas configurações candidatas.

A simulação analítica das faltas presume a análise da sequência de eventos que acontecem após a ocorrência de uma falta qualquer numa seção i do alimentador. Cada falta i impactará diferentemente as FIC e as DIC individuais de cada consumidor, e o acúmulo de impactos de todas as L faltas a serem analisadas resultam na totalidade dos índices FIC e DIC do período anual de cada consumidor. Nesta simulação, serão contabilizados os impactos em FIC e DIC apenas de faltas de primeira ordem e que conduzem a perda total de fornecimento de energia, ou seja, 0 p.u. A perda total é justificada pela operação de proteção que provoca interrupção de fornecimento de energia aos consumidores a jusante da proteção atuante. No que tange faltas de ordens superiores, devido às suas menores probabilidades de ocorrência, estas serão negligenciadas neste trabalho sem prejuízo do mérito do modelo proposto, já que os cálculos de confiabilidade pretendidos neste trabalho pressupõem, intrinsecamente, estimativas e probabilidades, e tal negligência não afetará consideravelmente os objetivos aqui pretendidos.

Os eventos que se seguem a partir da ocorrência de uma falta, por sua vez, são: operação do primeiro dispositivo de proteção montante; isolamento máximo da área de falta, restauração de energia via chaveamentos para consumidores fora da área de falta, reparo da falta, e finalmente a restauração da configuração original da rede. A busca por dispositivos, chaves e nós a montante ou a jusante de outros pontos é possibilitada pelo fato de o alimentador ser modelado em grafo, com a noção de nós “de” e “para”. Os passos da

seqüência que compõem a simulação analítica são seguidos pelo algoritmo para que seja possível calcular-se os impactos que cada falta gera nos índices individuais dos consumidores da rede:

0. Inicialização (P.7): Os FIC_j e DIC_j de cada nó consumidor do alimentador candidato são inicialmente zerados. Inicia-se também a variável de seção em falta i para a primeira seção passível de falta, dentre as L faltas possíveis.

1. Ocorrência de uma falta e operação da proteção:

Começa-se a simulação analítica de impactos da falta i no alimentador. Esta falta, com taxa anual de ocorrência λ_i e tempo médio de reparo r_i , provoca operação do primeiro dispositivo de proteção d_i a montante desta seção em falta, o que provoca um impacto inicial em todos os pontos j a jusante de d_i , já que todos esses consumidores terão seu fornecimento interrompido neste instante. A taxa λ_i aumenta as frequências de interrupções individuais desses consumidores, e o produto $\lambda_i r_i$ consiste no tempo de interrupção de energia sentido por esses consumidores caso eles não venham a ter seus fornecimentos restaurados por alguma manobra de chaveamento antes da falta ser reparada. Isto, portanto, provoca incremento $+\lambda_i$ em FIC_j e $+\lambda_i \cdot r_i$ em DIC_j para os pontos j a jusante de d_i , de acordo com (6), referente a **P.8**.

Se j está a jusante de d_i :

$$\Delta FIC_j = +\lambda_i \quad \Delta DIC_j = +\lambda_i \cdot r_i \quad (6)$$

2. Restauração a montante da falta: verifica-se se existe alguma chave NF simultaneamente a montante da falta i e a jusante do dispositivo de proteção d_i que atuou. Caso afirmativo, a primeira chave NF a montante da falta (vamos denominá-la NFM_i) é aberta, com tempo de chaveamento s_{NF} . A abertura dessa chave separa a área de falta da área que pode ter seu fornecimento de energia restaurado pela simples reconfiguração do dispositivo de proteção atuante d_i (por exemplo, se for um disjuntor, este poderá ser novamente fechado, sem perigo de alimentar a seção em estado de falta, que agora se encontra isolada pela abertura da chave NFM_i). Matematicamente, esta restauração significa decremento de $\lambda_i \cdot (r_i - s_{NF})$ nos períodos de interrupção de todos os pontos restaurados dessa maneira (esses pontos são todos os que não estão a jusante da chave NFM_i), e este decremento se deve ao fato de que os pontos aqui restaurados não mais serão interrompidos por todo o período de reparo r_i da falta i , e sim apenas pelo tempo necessário de manobra de abertura da chave. Assim, referente a **P.9**:

Se houver NFM_i , para todo j que não estiver a jusante de NFM_i fazer:

$$\Delta DIC_j = -\lambda_i \cdot (r_i - s_{NF}) \quad (7)$$

3. Restaurações por transferência de carga: toma-se o primeiro dispositivo a montante da falta que se abriu (chave NFM_i caso tenha sido possível restauração a montante da falta segundo o passo 2, ou equipamento de proteção atuante d_i caso contrário). A partir deste dispositivo, buscar a jusante uma chave NF que, por sua vez, tenha a jusante uma chave

NA. Se essa NF puder ser fechada, a área de falta estará isolada em relação à chave NA, que poderá ser fechada, em manobra de transferência de carga (caso as restrições de tensão e potência da transferência de carga sejam atendidas). Essa busca é repetida para todos os possíveis conjuntos NF-NA que permitam isolamento da área de falta e restauração por transferência de carga, e se refere a **P.10**.

Neste ponto, convém ressaltar que pode haver mais de uma chave NA atendendo às condições acima para um mesmo conjunto de pontos, isto é, talvez existam várias chaves NA no caminho a jusante de uma mesma chave NF que permitiu o isolamento da falta i . Nesse caso, apenas uma das chaves NA deve ser fechada, pois o fechamento simultâneo de mais de uma chave NA num mesmo caminho provocará geração de malhas fechadas no circuito, que foi projetado para operar apenas radialmente, o que consiste num perigo em termos de proteção da rede. A fim de que se evite o fechamento de mais de uma chave NA, o algoritmo deve realizar a manobra de apenas uma dessas chaves NA. A rigor, a escolha de qual chave deve ser manobrada para conduzir a uma maior eficiência é um problema à parte que, na realidade, deve passar por toda uma gama de análises combinatórias que requerem um estudo completamente externo, sendo que a literatura possui trabalhos específicos voltados apenas a estas análises [21]-[22]. Como esse estudo não consiste no foco deste trabalho, essas análises serão deixadas à parte e, com fins únicos de estimativa de confiabilidade, admitir-se-á o fechamento apenas da primeira chave NA de uma mesma região isolada encontrada pelo algoritmo, suprimindo-se assim possíveis coincidências.

Realizada enfim a busca por pares NF-NA que permitem isolamentos de áreas que admitem transferência de carga, todos os pontos que estão à jusante de cada uma dessas chaves NF poderão ter seu fornecimento restaurado. Designemos cada conjunto k de pontos pertencentes a um desses pares que permitem transferência como $NFNA_k$. Assim, cada consumidor j pertencente a uma área $NFNA_k$ terá seu fornecimento de energia restaurado, o que significa decremento de $\lambda_i \cdot (r_i - (s_{NF} + s_{NA}))$ nos períodos de interrupção desses pontos. Isto se deve ao fato de que esses pontos não mais serão interrompidos por todo o período de reparo r_i da falta i , e sim apenas pelo período de chaveamento conjugado das duas chaves supracitadas. Assim, referente a **P.11**:

Se j pertencer a alguma área $NFNA_k$:

$$\Delta DIC_j = -\lambda_i \cdot (r_i - (s_{NF} + s_{NA})) \quad (8)$$

4. Reparo da falta i e análise posterior: após calcular com os passos anteriores os impactos em FIC e DIC de todos os pontos j para a falta i , considera-se então o reparo da falta. A rede retorna ao seu estado original e, caso $i < L$, uma nova falta $i = i + 1$ é analisada. Essa simulação analítica de impactos de faltas é realizada até que todos os impactos nos índices de confiabilidade devido às L faltas em todas as seções sejam contabilizados, gerando-se finalmente os valores FIC e DIC consolidados da solução candidata. A mudança de análise de falta $i = i + 1$ ou parada quando $i = L$ refere-se a **P.12** e

P.13. Caso haja parada, os FIC_j e DIC_j consolidados permitem cálculo de FEC, DEC e CARC, o que é referente a **P.14**, e isto conclui a avaliação de aptidão de um cromossomo candidato da geração atual. Notar que essa avaliação é repetida para cada indivíduo da geração.

Os passos da simulação analítica para uma falta podem ser mais facilmente compreendidos com um exemplo. A Fig. 3 mostra a configuração normal de um alimentador (alimentador 1), com 13 unidades consumidoras, um disjuntor como dispositivo principal de proteção e algumas chaves NF que podem ser usadas em manobras diversas de reconfiguração da rede. O alimentador 1 está separado de outros alimentadores (alimentador 2 e alimentador 3) por meio de chaves NA, o que significa que em situação normal de operação dos alimentadores, inexistente fluxo de potência de um alimentador para outro.

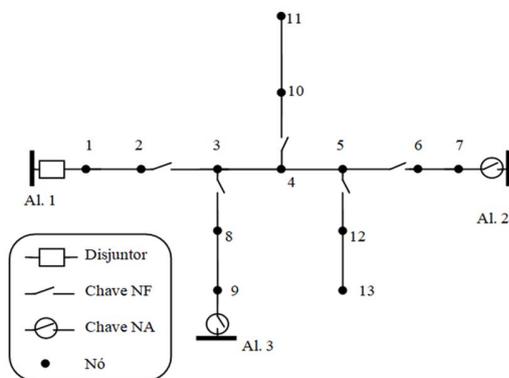


Fig. 3. Alimentador exemplo (*Al. – alimentador).

O alimentador 1 é suscetível a faltas. Entre quaisquer pares de nós deste alimentador, existe uma probabilidade de ocorrência de falta caracterizada por uma taxa anual de faltas (λ) que, por sua vez, requer um tempo de reparo (r) para restauração da situação normal de operação da rede. Cada falta desencadeará uma ativação de proteção e possíveis manobras de chaveamento para restauração do maior número possível de unidades consumidoras (representadas por “nós” nas figuras).

No caso, por exemplo, de falta entre os nós 3 e 4 (Fig. 4), o primeiro dispositivo de proteção à montante desta falta é o disjuntor, que ao atuar interromperá o fornecimento de energia a todos os nós à sua jusante, de 1 a 13, impactando os índices individuais FIC e DIC destas unidades consumidoras. Isto está de acordo com a equação (6), em que a varredura em grafo do alimentador pelo algoritmo, na ocasião desta falta, localizou o disjuntor inicial como sendo o primeiro dispositivo de proteção a montante da falta (d_i na equação (6), estando os nós de 1 a 13 à sua jusante).

Após a ocorrência dessa falta, algumas áreas podem ter sua energia restaurada. Primeiramente, a chave NF entre os nós 2 e 3 pode ser aberta, o que permite o retorno do disjuntor para sua configuração normal, restaurando a energia para os nós 1 e 2. Tal restauração está de acordo com a equação (7), em que a varredura em grafo do alimentador pelo algoritmo, na ocasião desta falta, localizou a chave no início da seção entre os nós 2 e 3 como sendo a primeira chave NF que estava

simultaneamente a montante da falta mas a jusante da proteção que atuou (NFM_i na equação (7), estando os nós 1 e 2 não-jusantes a essa chave).

Além disso, manobras de restauração por transferência de carga podem ser realizadas. A chave NF entre os nós 5 e 6 pode ser aberta de forma que se isole os nós 6 e 7 da área de falta, o que permitirá então o fechamento da chave NA que separa o alimentador 1 do alimentador 2, o que restaurará a energia para estes nós 6 e 7 por transferência de carga. O mesmo pode ser feito para os nós 8 e 9, abrindo-se a chave entre 3 e 8. Tais restaurações estão de acordo com a equação (8), em que a varredura em grafo do alimentador pelo algoritmo, na ocasião desta falta, localizou duas áreas $NFNA$ compostas por consumidores capazes de terem seus fornecimentos restaurados por transferência de carga ($NFNA_1$ formada pelos nós 6 e 7 e $NFNA_2$ formada pelos nós 8 e 9).

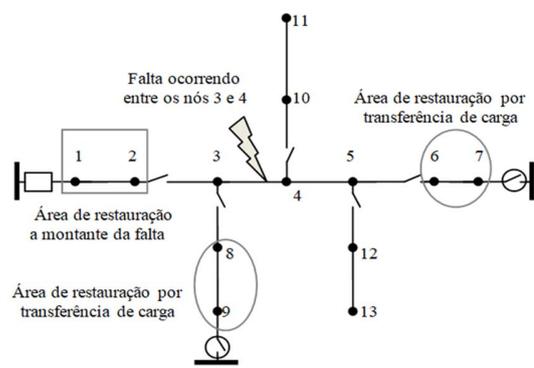


Fig. 4. Alimentador exemplo, com falta e manobras de restauração.

Os acréscimos e decréscimos em FIC e DIC foram mostrados como exemplo para uma falta entre os nós 3 e 4. Como já explicado, o algoritmo completa o cálculo total de FIC e DIC ao contabilizar todos os acréscimos e decréscimos para todas as L faltas possíveis no alimentador, com o intuito de se encontrar a aptidão desta distribuição de chaves NF no alimentador, traduzida em valores de CARC, FEC e DEC.

IV. RESULTADOS

O algoritmo proposto foi testado em alimentadores diversos, com bons resultados. Apresentam-se aqui resultados obtidos para um alimentador cujos dados figuram em [12].

Como já mencionado, devido ao caráter multi-objetivo pretendido, as otimizações conduzidas possuirão como função de aptidão o valor do CARC. Porém, serão também calculados para cada solução os índices FEC e DEC, pois estes se mostrarão úteis como complementos na análise das soluções. É interessante notar, quanto a isso, que a busca pela solução ótima quanto ao CARC do problema de alocação de chaves seccionadoras levará a valores mínimos de CARC, mas os valores de FEC certamente deverão ser invariáveis (já que, no caso de faltas sustentadas, manobras de restauração são capazes de modificar apenas a duração de uma interrupção de fornecimento de energia, e não a frequência de interrupções sofridas pelos consumidores). Quanto aos valores de DEC, não é possível uma previsão geral, já que a redução dos custos

totais de uma rede pode levar a valores maiores ou menores de DEC em relação à alocação original de chaves seccionadoras (já que a minimização da soma global de custos pode gerar soluções com maior custo de equipamentos e menor custo de interrupções, ou vice-versa, ou até mesmo de ambos). Obviamente, seria desejável que houvesse redução tanto do CARC quanto do DEC, mas isto depende de cada alimentador a ser solucionado pelo método. No alimentador utilizado para as simulações neste artigo, resultados interessantes neste aspecto serão obtidos, como será visto nesta seção.

A. Dados do Alimentador em Sua Configuração Original

O sistema consiste num alimentador com 51 seções e 44 pontos de carga, sendo parte de uma rede de distribuição real da PEA: Provincial Electricity Authority of Thailand, tratado daqui por diante como PEA 51.

Esse alimentador possui em seus arredores outros quatro alimentadores, separados dele por meio de chaves normalmente abertas (que podem ser fechadas em caso de contingências para que se faça a restauração de serviço em alguns pontos de carga do alimentador de 51 seções). Essa rede está apresentada na Fig. 5. O comprimento de cada seção, o número de consumidores e a carga média conectada em cada seção estão listados na Tabela I.

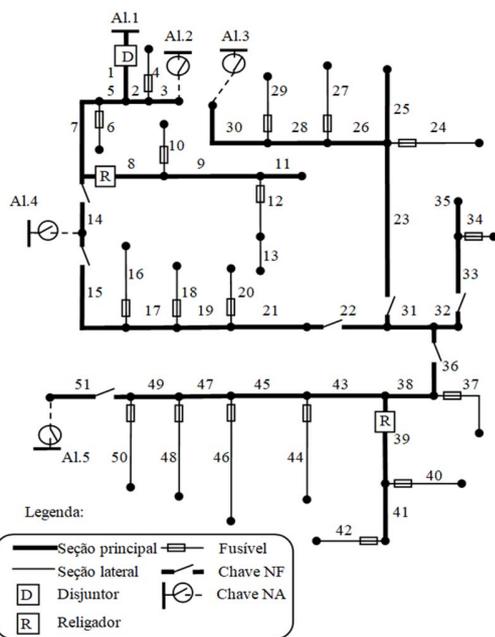


Fig. 5. Alimentador real (Al.1), com 51 seções. O número identificador de cada seção está indicado o mais próximo possível destas. Há quatro alimentadores nas redondezas (Al.2, Al.3, Al.4, Al.5) que permitem manobras de transferência de carga por chaves NA.

Outros detalhes seguem:

- Taxas de faltas sustentadas: $\lambda = 0,17$ faltas/km.ano;
- Tempo médio de reparo de uma falta: 2 h;
- Tempo médio de chaveamentos e transferências de cargas: 0,5 h;
- As funções de dano dos consumidores da rede são mostradas na **referência**. e foram extraídas do próprio trabalho [12].

Valores de função de dano para durações de interrupção diferentes serão obtidos por interpolação entre as faixas adjacentes à duração. O custo anual de uma chave NF também foi extraído de [12], como sendo US\$ 2500,00/ano. A opção por se utilizar valores de função de dano e custos de chaves referenciados a um mesmo trabalho tende a uniformizar o valor do dólar a uma mesma época, além de alinhar os custos à região na qual o alimentador se encontra.

- Os índices de confiabilidade da rede original são apresentados na Tabela III. Nesta tabela, também incluímos o valor do CARC calculado para a rede original.

TABELA I
COMPRIMENTO, CARGA MÉDIA E NÚMERO DE CONSUMIDORES EM CADA SEÇÃO DO PEA 51 (DADOS RETIRADOS DE [12])

Seção	Comp (km)	Carga (kVA)	Nº cons	Seção	Comp (km)	Carga (kVA)	Nº cons
1	3,4	0	0	27	0,9	110	80
2	0,5	0	0	28	4,2	590	120
3	0,1	0	0	29	0,7	90	93
4	0,4	150	55	30	2,3	170	145
5	0,5	0	0	31	2,8	480	65
6	1,0	220	89	32	1,5	2400	80
7	1,0	0	0	33	1,3	210	102
8	3,0	1250	145	34	0,6	50	20
9	0,5	90	85	35	0,5	100	30
10	0,3	90	1	36	0,1	0	0
11	1,2	445	200	37	2,5	100	65
12	1,0	720	2	38	3,2	480	50
13	1,0	30	55	39	0,8	500	1
14	0,3	0	0	40	3,0	450	220
15	2,9	150	55	41	2,7	150	95
16	3,0	50	57	42	3,0	110	125
17	1,7	60	105	43	9,3	60	167
18	1,3	310	243	44	3,5	150	141
19	2,0	340	147	45	1,2	50	21
20	1,4	30	47	46	2,0	140	93
21	1,0	2130	107	47	0,9	36	106
22	0,4	250	30	48	1,3	60	90
23	2,3	780	117	49	1,3	30	17
24	4,0	610	135	50	5,0	160	145
25	0,7	80	95	51	2,0	1350	67
26	1,5	60	50				

*COMP - COMPRIMENTO; CONS – CONSUMIDORES.

TABELA II
FUNÇÃO DE DANO POR CONSUMIDOR NOS PONTOS DE CARGA EM CASO DE INTERRUPÇÕES (DADOS EXTRAÍDOS DE [12])

Duração da interrupção	FDC: Função de dano por consumidor (US\$/ano)
Momentânea	0,245
30 min	0,937
1,5 h	2,802

TABELA III
ÍNDICES DE CONFIABILIDADE DA REDE ORIGINAL (DADOS EXTRAÍDOS DE [12]). CARC CALCULADO PARA A REDE ORIGINAL

Parâmetro	Valor
FEC	8,67
DEC	10,03

CARC	212.970,00
------	------------

1	8,64	6,05	185800
2	8,64	6,04	185110
3	8,64	5,64	177730

B. Processo de Otimização

A aplicação do método proposto nesse caso teve os seguintes parâmetros para as operações genéticas:

- *Construção de cromossomos*: das 51 seções do alimentador, definiu-se que 31 poderiam receber ou não chaves NF. Essas 31 seções referem-se a todas as seções principais, excetuando-se a primeira seção referente ao disjuntor. Seções restantes são ramais laterais protegidos por fusíveis, que não receberão chaves NF. Portanto, temos para a análise de alocação de chaves as seções: 2, 3, 5, 7, 8, 9, 11, 14, 15, 17, 19, 21, 22, 23, 25, 26, 28, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 38, 39, 41, 43, 45, 47, 49 e 51.

- *População inicial*: foi considerado o valor de 3000 indivíduos na população inicial.

- *Cruzamento, mutação e elitismo*: foram utilizados fatores, respectivamente, de 80%, 0,1% e 3% para tais critérios.

- *Critério de parada*: 500 gerações.

Ademais, três simulações foram conduzidas:

Simulação I – restrição de chaves NF apenas no início de cada seção (nó “de”, significando cromossomos de 31 bits, referentes às possibilidades binárias de se alocar chaves apenas no início de cada uma das 31 seções elegíveis);

Simulação II – restrição de chaves NF apenas no fim de cada seção (nó “para”, significando cromossomos de 31 bits, referentes às possibilidades binárias de se alocar chaves apenas no fim de cada uma das 31 seções elegíveis);

Simulação III – chaves NF podendo enfim ser alocadas tanto no início quanto no fim de cada seção (significando cromossomos de 62 bits devido à dupla possibilidade de alocação em cada uma das 31 seções elegíveis).

Os resultados das simulações foram dispostos em duas tabelas. Na Tabela IV, foram colocados os posicionamentos das chaves NF de cada solução e a quantidade dessas chaves presente nas soluções. Observe que a listagem das seções que receberam chaves foi dividida em duas colunas: uma para as seções com chaves no início da seção (mais próximas do nó “de”) e outra para seções com chaves ao final da seção (mais próximas do nó “para”). Já na

Tabela V foram colocados os valores das aptidões em si das soluções, incluindo, além do CARC, o FEC e o DEC de cada solução (como já explicado).

TABELA IV

ALOCAÇÃO DE CHAVES NF DAS SIMULAÇÕES CONDUZIDAS

Simulação	Seções com chave NF no início	Seções com chave NF ao final	Quantidade de chaves NF
1	7 – 14 – 21 – 23 – 26 – 31 – 33 – 36 – 43 – 45 – 51	-	11
2	-	7 – 14 – 19 – 22 – 23 – 26 – 31 – 36 – 43 – 51	10
3	14 – 22 – 26 – 33 – 36 – 43	7 – 19 – 23 – 28 – 31 – 38 – 45 – 51	14

TABELA V

RESULTADOS DE ÍNDICES DE CONFIABILIDADE E CUSTOS DAS SIMULAÇÕES CONDUZIDAS

Simulação	FEC (falhas/ano)	DEC (h/ano)	CARC (US \$/ano)
-----------	------------------	-------------	------------------

A partir dos resultados obtidos, são feitas as seguintes constatações:

I – A FEC da rede original, como mostrado na Tabela III, é de 8,67, enquanto nas simulações obtidas o valor encontrado para esse índice foi de 8,64. A esta diferença de cerca de 0,3% entre os valores, considera-se que foi apenas de diferentes arredondamentos feitos durante o processo de cálculo de índices de confiabilidade entre a simulação analítica conduzida pelo método proposto e o cálculo original de FEC. A rigor, a FEC não sofre variação em nenhuma alocação de chaves, já que manobras de chaveamento não mudam as frequências de interrupções sentidas pelos consumidores.

II – Não existe relação direta entre CARC (custos totais de chaves e interrupções) e DEC, pois como já explicado neste trabalho, a diminuição de CARC pode acarretar aumento ou diminuição de DEC dependendo do alimentador simulado. Neste caso, porém, em todas as otimizações conduzidas, a diminuição do CARC levou também a diminuições de DEC em relação à configuração original da rede. Isto pode ser explicado pelo fato de que, na alocação de chaves original (7 chaves em posições não-ótimas), as manobras de chaveamento possíveis não levam a bons decrementos de DEC, havendo uma baixa eficiência nessa disposição original de chaves que conduz tanto a custos maiores quanto a períodos de interrupção de fornecimento maiores. Isto evidencia o valor do caráter multi-objetivo do método proposto, que pode conduzir a soluções que sejam interessantes tanto do ponto de vista de melhoria econômica quanto de confiabilidade da rede.

III – Os resultados mostram categoricamente que a possibilidade de instalação de chaves em ambas as extremidades das seções pode conduzir a resultados melhores – novamente, tanto em DEC quanto em custos, devido ao caráter multi-objetivo da formulação do CARC. Comenta-se novamente aqui que a literatura pesquisada concentrava as simulações apenas em alocação de chaves mais próximas aos nós “de” de cada seção. Traduzindo em termos binários do cromossomo, a inclusão (1) ou não (0) de chave em uma seção do alimentador, caso seja restrita a apenas um dos extremos da seção, leva a duas possibilidades por seção (0 ou 1 por seção), enquanto a possibilidade de se alocar chaves em ambos os extremos da seção leva a quatro possibilidades por seção (00, 01, 10 ou 11 por seção, considerando ambas as suas extremidades). O algoritmo genético passa a trabalhar com o dobro de bits, mas isto é irrelevante em face aos benefícios que podem ser trazidos aos alimentadores otimizados desta maneira.

IV – Muitas das seções que receberam chaves figuraram nos três tipos de otimização (seções 7, 14, 23, 26, 31, 36, 43, 51), e, portanto certamente são seções que permitem boas manobras de restauração de fornecimento de energia no caso de faltas. Há, contudo, diferentes preferências de extremidade para tais seções quando se remove restrições de alocação em apenas uma das extremidades da seção. Repare que, quando estas restrições são removidas (Simulação 3), as chaves das seções 14, 26, 36 e 43 ficam no início dessas seções, enquanto as chaves das seções 7, 23, 31 e 51 ficam ao final dessas

seções. Este é mais um indicativo de que a simples mudança na extremidade onde se aloca uma chave pode gerar impactos positivos tanto em custos quanto em confiabilidade.

V – Como era de se esperar, a otimização na alocação de chaves sem restrições de em qual extremidade de seção elas podem figurar (Simulação 3), levou ao melhor resultado de CARC, pois assim um número maior de soluções candidatas pôde ser testada, sendo que tais soluções permitiam maior flexibilidade nas manobras de restauração possíveis. Comparativamente com o custo anual do alimentador original, o CARC é 16,55% menor, e comparativamente com as soluções otimizadas com restrição de alocação de chaves no início (Simulação 1) e no fim (Simulação 2) de cada seção, respectivamente, o CARC é menor em 4,3% e 3,99%. Além disso, o caráter multi-objetivo da otimização conduzida também produziu uma interessante redução em DEC, de modo que este índice para a Simulação 3 foi menor do que o da alocação original (em 43,77%), o da Simulação 1 (em 6,78%) e o da Simulação 2 (em 6,62%). Em suma, a Simulação 3 obteve melhorias expressivas tanto em custos quanto em confiabilidade.

VI – Estatísticas de aptidão fornecidas pelo algoritmo, constando os valores de CARC máximo, mínimo e médio presentes em cada uma das 200 primeiras gerações, para a simulação 1, são mostrados na Fig. 6. Indica-se que a convergência foi alcançada antes da centésima geração nos três casos, haja vista que o valor mínimo de CARC alcançou o valor mínimo rapidamente com os parâmetros utilizados das operações genéticas (população inicial, cruzamento, mutação e elitismo). Mesmo assim, como já exposto anteriormente, foram fixadas em 500 gerações o limite de gerações de cada simulação antes que o algoritmo retornasse os resultados. Isto foi feito para que se deixasse uma margem de possibilidade de mutações benéficas. De qualquer modo, cada uma das três simulações foi rodada algumas vezes, e o mesmo resultado de minimização de CARC foi obtido, o que aumenta a possibilidade de tais valores serem máximos globais – apesar de a própria natureza heurística da otimização por algoritmo genético não permita que isso seja garantido com completa certeza.

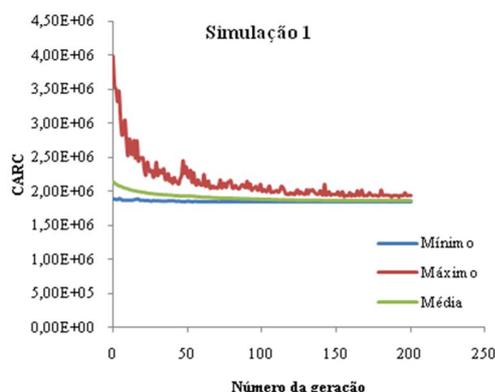


Fig. 6. CARC mínimo, máximo e médio para as 200 primeiras gerações da Simulação 1.

V. CONCLUSÕES

Foi apresentado neste artigo um método de otimização de redes de distribuição baseado em algoritmos genéticos. Este método visa à obtenção de soluções otimizadas do problema de alocação de chaves seccionadoras em alimentadores. Diferentes números e posicionamentos de chaves normalmente fechadas nas seções de um alimentador levam a diferentes possibilidades de manobras de restauração de energia no caso de faltas que acarretam interrupções no fornecimento de energia, de modo que alocações otimizadas dessas chaves podem reduzir períodos de interrupção de fornecimento.

A aptidão das soluções candidatas foi baseada num critério denominado CARC, que consiste na soma dos custos anuais referentes a chaves seccionadoras e interrupções. Este critério, por englobar tanto custos com chaves e quanto custos de interrupções, pode levar a soluções que, além de serem mais viáveis economicamente, sejam também melhores do ponto de vista da confiabilidade da rede, permitindo uma otimização multi-objetivo.

Na modelagem apresentada, cada seção elegível a receber uma chave seccionadora em um alimentador foi considerada como podendo receber chave em qualquer uma das extremidades da seção, ou seja, mais próximo do nó “de” ou do nó “para” da seção. Isto faz com que melhores soluções possam ser alcançadas, já que permite maior flexibilização de manobras de restauração de energia. Foi mostrado, tanto teoricamente quanto por meio de simulações, que a variação no posicionamento de uma chave numa mesma seção, de um extremo para o outro, pode levar a grandes diferenças nas manobras de restauração possíveis, o que impacta tanto as durações de interrupção percebidas por pontos da rede quanto os custos de interrupção. Análises e discussões sobre essas possibilidades não foram encontradas na literatura pesquisada.

O algoritmo genético desenvolvido associa cromossomos a cada solução candidata, de forma a traduzir de forma binária a existência ou não de chave normalmente fechada em cada extremo de cada seção passível de receber chave no alimentador. Cada solução candidata de uma geração do algoritmo genético, por sua vez, passa por uma simulação analítica de faltas. Essa simulação analítica avalia como cada falta na solução candidata impacta as FIC e DIC de seus consumidores, considerando suas respostas de proteção à falta e manobras de restauração possíveis, visando à obtenção da aptidão (CARC) e também, como complemento, dos índices de confiabilidade FEC e DEC dessa solução candidata. Uma vez calculadas as aptidões de cada indivíduo de uma geração, estes podem passar por operações genéticas, o que leva a uma nova geração (em tese) mais apta que anterior. Novos cálculos de aptidão e operações genéticas são realizados, até que o critério de parada seja satisfeito e a solução otimizada seja encontrada.

Um alimentador real foi apresentado, tendo sido simulado em três situações. O objetivo era a obtenção de soluções otimizadas quanto ao CARC, de forma a se encontrar a alocação de chaves normalmente fechadas nos alimentadores que conduzisse a menores custos conjugados de chaves e

interrupções. Na primeira situação, restringiu-se a alocações de chaves apenas no início de cada seção (o que é comumente encontrado na literatura). Na segunda situação, mudou-se a restrição para permitir alocação apenas ao final de cada seção. Já na terceira situação, que condiz finalmente com o modelo proposto, não houve restrições, permitindo que houvesse quatro possibilidades para cada seção passível de receber chaves normalmente fechadas; ou seja, combinações duplas de bits por seção, de forma a significar presença ou ausência de chave NF em cada extremo de uma mesma seção.

Os resultados obtidos mostraram que, no modelo proposto de não haver restrições quanto à alocação de chaves em uma ou outra extremidade de uma seção, há redução expressiva de custos em relação à alocação original, e significativa em relação às alocações com restrição. O caráter multi-objetivo da função de aptidão também mostrou-se interessante, pois as otimizações levaram tanto a custos quanto DEC reduzidos. A solução sem restrições obteve os menores valores de CARC e DEC, o que seria interessante tanto para a concessionária de energia responsável pelo alimentador quanto para a sociedade. Nota-se, também, que as operações genéticas levaram apenas algumas dezenas de gerações para estagnar o valor mínimo de custos, o que é interessante do ponto de vista computacional.

Conclui-se, portanto, que o algoritmo apresentado é interessante para se resolver o problema de alocação de chaves seccionadoras nas redes de distribuição, por conduzir a soluções otimizadas que podem não apenas minimizar os custos da rede, como também aumentar sua confiabilidade. Embora a própria natureza heurística dos algoritmos genéticos não permita garantia no encontro do ótimo global do problema, certamente esta ferramenta se mostra útil na obtenção, com eficiência, de soluções expressivamente melhores em relação às alocações não-otimizadas.

REFERÊNCIAS

- [1] Agência Nacional de Energia Elétrica. "PRODIST: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional". Revisão vigência 2018.
- [2] J. S. Dominguez, A. J. C. Junior, D. S. Dominguez, D. Frias, and S. M. Iglesias, "Using a Multi-Agent System for Monitoring Indicators of Quality of Service in Power Distribution Networks," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 4, pp. 1048–1054, Apr. 2015.
- [3] D. R. R. Penido, L. R. Araujo, and M. C. Filho, "A Fault Analysis Algorithm for Unbalanced Distribution Systems," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 1, pp. 107–115, Jan. 2015.
- [4] R. E. Brown, "Electric Power Distribution Reliability," 2nd edition. CRC Press, 2009.
- [5] F. M. Rodrigues, "Multi-objective optimization of distribution networks using genetic algorithms," *Dissertação de Mestrado*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora (2015).
- [6] C. E. P. Tenemaza and E. M. I. Ortega, "State of Art, Reliability In Electrical Distribution Systems Based On Markov Stochastic Model." *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 2, pp. 799–804, Feb. 2016.
- [7] R. Billinton and S. Jonnavithula, "Optimal switching device placement in radial distribution systems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 11, no. 3, pp. 1646–1651, Jul. 1996.
- [8] F. Soudi, K. Tomsivic, "Optimized distribution protection using binary programming," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 13, no. 1, pp. 218–224, Jan. 1998.
- [9] L. G. W. da Silva, R. A. F. Pereira, J. R. S. Mantovani, "Allocation of protective devices in distribution circuits using nonlinear programming

- models and genetic algorithms," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 69, no. 1, pp. 77–84, April 2004.
- [10] C.-S. Chen, C.-H. Lin, H.-J. Chuang, C.-S. Li, M.-Y. Huang, and C.-W. Huang, "Optimal placement of line switches for distribution automation systems using immune algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 3, pp. 1209–1217, Aug. 2006.
- [11] A. Moradi and M. Fotuhi-Firuzabad, "Optimal Switch Placement in Distribution Systems Using Trinary Particle Swarm Optimization Algorithm," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 1, pp. 271–279, Jan. 2008.
- [12] W. Tippachon and D. Rerkpreedapong, "Multiobjective optimal placement of switches and protective devices in electric power distribution systems using ant colony optimization," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, no. 7, pp. 1171–1178, Jul. 2009.
- [13] A. J. Benavides, M. Ritt, L. S. Buriol, and P. M. França, "An iterated sample construction with path relinking method: Application to switch allocation in electrical distribution networks," *Comput. Oper. Res.*, vol. 40, no. 1, pp. 24–32, Jan. 2013.
- [14] A. Alam, V. Pant, and B. Das, "Switch and recloser placement in distribution system considering uncertainties in loads, failure rates and repair rates," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 140, pp. 619–630, Nov. 2016.
- [15] A. V. Pombo, J. Murta-Pina, and V. F. Pires, "A multiobjective placement of switching devices in distribution networks incorporating distributed energy resources," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 130, pp. 34–45, Jan. 2016.
- [16] S. Ray, A. Bhattacharya, and S. Bhattacharjee, "Optimal placement of switches in a radial distribution network for reliability improvement," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 76, pp. 53–68, Mar. 2016.
- [17] J. C. López, M. Lavorato, and M. J. Rider, "Optimal reconfiguration of electrical distribution systems considering reliability indices improvement," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 78, pp. 837–845, Jun. 2016.
- [18] J.-M. Sohn, S.-R. Nam, and J.-K. Park, "Value-based radial distribution system reliability optimization," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 941–947, May 2006.
- [19] C. Girón, F. J. Rodríguez, L. Giménez de Urtasum, and S. Borroy, "Assessing the contribution of automation to the electric distribution network reliability," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 97, pp. 120–126, Apr. 2018.
- [20] Ž. Popović, B. Brbaklić, and S. Knežević, "A mixed integer linear programming based approach for optimal placement of different types of automation devices in distribution networks," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 148, pp. 136–146, Jul. 2017.
- [21] S. Mishra, D. Das, S. Paul, "A comprehensive review on power distribution network reconfiguration," *Energy Systems*, vol. 8, n. 2, pp. 227–284, 2017.
- [22] B. J. D. Costa, L. R. de Araujo and D. R. R. Penido, "A Heuristic Method of Restoring Distribution Systems Using Field Measurements," *IEEE Systems Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 1841–1850, June 2019.



Fabio Miranda Rodrigues possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (2013) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (2015). Atualmente, é doutorando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora.



Leandro Ramos de Araujo (M'2009; SM'2015) possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (1993), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (2000) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do

Rio de Janeiro/COPPE (2005). Professor associado da Universidade Federal de Juiz de Fora.



Débora Rosana Ribeiro Penido (S'1999; M'2009; SM'2013) possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (2002), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (2004) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE (2010). Professora associada da Universidade Federal de Juiz de Fora.