

# O Problema de Restabelecimento da Energia em Sistemas de Distribuição Radiais Considerando as Restrições de Proteção

Etiane O. P. de Carvalho\* Denis V. Coury\* Mário Oleskovicz\*  
João Bosco A. London Jr.\*

\* Departamento de Engenharia Elétrica e Computação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP (e-mail: etiane@usp.br, coury@sc.usp.br, olesk@sc.usp.br, jbalj@sc.usp.br).

**Abstract:** The Network Reconfiguration (RR) process causes a change in the topology of the Distribution System (SD) through a plan to restore energy in real time, which in turn can cause an increase in the load current and change the short-circuit levels on some adjacent feeders. In view of this, some protection devices may operate in an undesirable manner. However, consideration of protection for the RR problem has been avoided in the literature, since it makes the problem even more complex. This work proposes to incorporate the phase and neutral overcurrent protection restrictions in the basic methodology of an AEMT (Multi-Objective Evolutionary Algorithm in Tables) for the problem of restoration in a radial SD. In this work, three-phase, two-phase faults with and without earth involvement and single-phase faults will be considered, in addition to the parameterization of the overcurrent relays for each SD feeder under analysis. The tests were carried out in an SD commonly used and found in the related technical-scientific literature. The results were promising for the proposed approach, it was observed that when including the protection restrictions the results were changed, showing the importance of considering this restrictions.

**Resumo:** O processo de Reconfiguração de Redes (RR) provoca uma mudança na topologia do Sistema de Distribuição (SD) por meio de um plano de restabelecimento de energia em tempo real, que por sua vez pode ocasionar um aumento da corrente de carga e a alteração dos níveis de curto-circuito em alguns alimentadores adjacentes. Diante disso, alguns dispositivos de proteção podem operar de forma indesejável. No entanto, a consideração da proteção para o problema de RR tem sido evitada na literatura, uma vez que torna ainda mais complexo o problema. Este trabalho propõe incorporar as restrições de proteção de sobrecorrente de fase e neutro na metodologia base de um Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo em Tabelas (AEMT) para o problema de restabelecimento em um SD radial. Neste trabalho serão consideradas faltas trifásicas, bifásicas com e sem o envolvimento da terra e monofásicas, além da parametrização dos relés de sobrecorrente para cada alimentador do SD em análise. Os testes foram realizados em um SD comumente empregado e encontrado na literatura técnico-científica correlata. Os resultados foram promissores para a abordagem proposta, observou-se que ao incluir as restrições de proteção a sequência de chaveamento foi alterada em alguns casos, mostrando a importância de considerá-las.

*Keywords:* Service Restoration; Multi-Objective Evolutionary Algorithm; Distribution System.

*Palavras-chaves:* Restabelecimento de Energia; Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo; Sistemas de Distribuição.

## 1. INTRODUÇÃO

Interrupções no fornecimento de energia nos Sistemas de Distribuição (SDs) são inevitáveis e podem ser provocadas por diversos fatores. Nesse contexto vale destacar que, em razão de os SDs operarem na configuração radial, eles possuem baixa confiabilidade em termos de continuidade do fornecimento de energia. Ou seja, a continuidade do

fornecimento depende do correto funcionamento de todos os equipamentos entre a fonte e a carga. Dessa forma, a atuação de dispositivos de proteção, em decorrência de faltas (curtos-circuitos) permanentes, interrompe o fornecimento de energia para todos os consumidores localizados à jusante desses dispositivos, mesmo aqueles localizados em regiões cujas redes elétricas não foram afetadas pelas faltas (Zidan et al., 2017).

As concessionárias têm investido em soluções para automatizar a operação, visando melhorar os indicadores de

\* Os autores agradecem à Universidade de São Paulo (USP) e às agências de fomento CAPES (processo n° 88887.510860/2020-00) e CNPq (processo n° 134387/2018-0).

continuidade de energia e aumentar a confiabilidade das suas redes de distribuição. Sendo assim, com o intuito de reduzir o custo das compensações e aumentar a satisfação dos consumidores, as distribuidoras buscam a redução dos indicadores por meio do restabelecimento de energia, sendo a Reconfiguração de Rede (RR) uma forma de abordar esse problema. O processo de RR consiste na mudança da topologia do SD por meio de operações em chaves seccionadoras Normalmente Abertas (NAs) e Normalmente Fechadas (NFs). Quando aplicado ao problema de restabelecimento de energia, o processo de RR tem como principal objetivo restabelecer o maior número de cargas saudáveis desligadas (cargas que não foram afetadas diretamente pela falta, ou seja, encontram-se à jusante ou montante do setor<sup>1</sup> faltoso), mantendo as restrições operacionais dentro dos limites permitidos e preservando a estrutura radial (Shen et al., 2020).

O problema de restabelecimento por RR é desafiador, visto que leva em consideração diversos fatores e variáveis. Um exemplo disso é o conflito entre seus principais objetivos, que visa, simultaneamente, minimizar o número de setores restauráveis<sup>2</sup> e o número de manobras de chaveamento. Ademais, muitos aspectos práticos precisam ser considerados durante o processo de restabelecimento, tais como, atender aos consumidores prioritários, considerar diferentes níveis de prioridade, considerar a possibilidade de cortes de carga, prover uma sequência de chaveamento e priorizar manobras de chaves controladas remotamente.

O processo de obtenção de um adequado Plano de Restabelecimento de Energia (PRE) é um problema de otimização combinatória e, de uma forma geral, os métodos desenvolvidos para sua solução podem ser divididos em dois grandes grupos: os baseados em abordagens tradicionais, como os métodos de programação matemática; e os baseados em técnicas alternativas, isto é, busca heurística, sistemas especialistas, metas-heurísticas e Sistemas Multiagentes (Shen et al., 2020). A busca por técnicas alternativas é motivada em função das dificuldades encontradas pelas abordagens tradicionais para tratar do problema de restabelecimento de energia em SDs envolvendo o processo de RR, lembrando ainda da exigência da obtenção da solução em tempo real. Além disso, o elevado número de variáveis do problema pode levar a uma explosão combinatória, dificultando ainda mais a utilização de programação matemática para SDs de grande porte (com milhares de linhas, barras de carga e chaves seccionadoras) (Carrano et al., 2016; Camillo et al., 2016).

Dessa forma, os métodos propostos em Carrano et al. (2016) e pelo grupo de pesquisa do LACOSEP são mais viáveis para aplicação em SDs reais de grande porte. Visto que, em função de serem baseados em Algoritmos Evolutivos Multiobjetivos (AEMOs), eles são mais flexíveis, podendo ser aplicados independentemente da infraestrutura e da filosofia de operação dos SDs e da definição de regras heurísticas, contrário aos outros métodos alternativos. O Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo em Tabelas (AEMT) emprega um algoritmo eficiente para contagem

<sup>1</sup> Um setor consiste de um agrupamento de barras de carga, subestação ou de passagem, interconectados por chaves seccionadoras.

<sup>2</sup> Setores saudáveis que foram desligados devido ao isolamento da falta e são restauráveis, pois existem chaves NAs capazes de restabelecê-los.

do número de operações de manobras, que não exige o armazenamento, para cada configuração, do estado das chaves presentes no SD. Ao longo dos últimos anos, diversas melhorias foram realizadas no AEMT para aumentar a sua eficiência na exploração do espaço de busca e para possibilitar o tratamento de características práticas do problema (Camillo et al., 2016; Marques et al., 2018; Fernandes, 2019). Além disso, o AEMT é capaz de lidar eficientemente com SDs de grande porte (com milhares de barras e chaves).

Este trabalho propõe então incorporar as restrições de proteção de sobrecorrente de fase e neutro no AEMT para o problema de restabelecimento em sistemas de distribuição radiais. Os testes foram realizados em um sistema de distribuição comumente empregado e encontrado na literatura técnico-científica correlata, sendo os resultados promissores para a abordagem proposta.

## 2. ENUNCIADO FORMAL DO PROBLEMA

A Energia Não Suprida (ENS) corresponde à quantidade de energia não fornecida para os consumidores devido à interrupção do serviço. Os valores de ENS relacionam a Potência Não Suprida (PNS) e o tempo necessário para realizar as manobras, sendo mais importante para os indicadores de continuidade de energia do que o número final de consumidores desligados ou a PNS, conforme proposto por Mohammadi and Afrakhte (2012). Portanto, o problema de RR pode ser formulado como um problema multiobjetivo a fim de minimizar a ENS e número de operações de manobras, considerando as restrições operacionais do SD (Shin et al., 2004). O problema de RR pode ser formulado de acordo com a Equação 1 (Marques, 2018).

Minimizar:

$$ENS(G), \psi(G)$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} A(G^e)x(G^e) &= c(G^e) \\ A(G^e)Y_x(G^e)A(G^e)^t v(G^e) &= c(G^e) \\ X(G^e) &\leq 1 \\ B(G^e) &\leq 1 \\ V(G^e) &\leq \delta \\ G &\text{ deve ser radial} \\ G &= G^e \cup G^{me} \\ seq(G) &\text{ ser factível} \end{aligned} \quad (1)$$

No qual  $G$  é uma configuração radial do SD, representada por uma floresta de grafos;  $G^e$  é a porção de  $G$  que se encontra em serviço, a qual representa todos os alimentadores energizados em  $G$ ;  $G^{me}$  é a porção de  $G$  que se encontra fora de serviço, ou seja, a parte desenergizada da rede em  $G$ ;  $ENS(G)$  é a Energia Total Não Suprida durante o intervalo de tempo  $\Delta_{t4}$  (intervalo de tempo necessário para a execução das ações de reparo nos setores em falta);  $\psi(G)$  é o número total de manobras para obtenção de  $G$  a partir da configuração em operação antes da atuação do sistema de proteção (definida usualmente como configuração pré-falta ( $G^{pf}$ ));  $A(G^e)$  é a matriz de incidência nó-aresta pseudo-orientada (obtida através de um grafo orientado das correntes) de  $G^e$ ;  $x(G^e)$  é o vetor de correntes complexas nas linhas em  $G^e$ ;  $c(G^e)$  é

o vetor de correntes complexas demandadas em barras de carga e injetadas em barras de subestações em  $G^e$ ;  $Y_x(G^e)$  é a matriz diagonal de admitâncias da rede em  $G^e$ ;  $v(G^e)$  é o vetor de tensões complexas nas barras em  $G^e$ ;  $X(G^e)$  é o máximo valor de carregamento de rede em  $G^e$ , dado por  $X(G^e) = \text{MAX}\{x_j/\bar{x}_j\}$ , no qual  $\bar{x}_j$  é o limite superior de corrente para cada magnitude de corrente  $x_j$  em uma linha  $j$ ;  $B(G^e)$  é o máximo valor para carregamento da subestação (transformador) em  $G^e$ , dado por  $B(G^e) = \text{MAX}\{b_s/\bar{b}_s\}$ , sendo  $\bar{b}_s$  o limite superior para cada magnitude de injeção de corrente  $b_s$  provida por uma subestação  $s$ ;  $V(G^e)$  é a máxima queda de tensão em  $G^e$ , dada por  $V(G^e) = \text{MAX}\{|v_s - v_k|/v_s\}$ , sendo  $v_s$  a magnitude de tensão na barra de uma subestação  $s$  (mais especificamente, na barra secundária do transformador da subestação  $s$ ),  $v_k$  é a magnitude de tensão em uma barra  $k$  da rede e  $\delta$  é a máxima queda de tensão admissível ( $\delta = 0, 1$ , isto é, 10% (Marques, 2018)); e  $\text{seq}(G)$  representa a sequência de chaveamento a ser executada para obtenção de  $G$ , isto é, a sequência na qual devem ser executadas as manobras necessárias para obtenção de  $G$  a partir de  $G^{pf}$ .

Outro aspecto importante para a representação computacional e eficiente de SDs é o uso da Representação Nó Profundidade (RNP), uma estrutura de grafo proposta por Delbem et al. (2004). Neste artigo, a RNP é usada para representar computacionalmente a parte energizada e não energizada (setores restauráveis) do SD. A RNP possui, adicionalmente, operadores genéticos que geram apenas configurações radiais. Conseqüentemente, o uso da RNP naturalmente garante a última restrição.

### 3. METODOLOGIA BASE

Para desenvolvimento da metodologia proposta será utilizado como base o trabalho desenvolvido recentemente pelo grupo de pesquisa do LACOSEP apresentado em Fernandes (2019). A metodologia base faz uso de um AEMT e da estrutura para representação computacional de árvores de grafo RNP. São várias as etapas que compõem a metodologia base, partindo do setor em falta identificado até o fornecimento de PREs, que incluem a obtenção de uma sequência de chaveamento. A metodologia base pode ser dividida, de modo simplificado, em seis etapas como mostra a Figura 1.

#### 3.1 Leitura de dados

A execução da metodologia base inicia-se pela: (a) obtenção das informações da rede primária de distribuição em sua configuração pré-falta (dados de topologia, impedância e capacidade de condução de cada trecho, localização e tipo de cada chave, localização e grau de prioridade dos consumidores, demanda de potência ativa e reativa das cargas, etc.); (b) da lista do setor em falta; e (c) da lista com os valores escolhidos para os parâmetros da metodologia (conforme detalhado em Fernandes (2019)). É nesta etapa que a metodologia armazena a topologia elétrica da rede primária em RNPs.

#### 3.2 Obtenção da configuração inicial

Visto que os dados foram devidamente organizados, pode-se iniciar as etapas do problema de restabelecimento. A

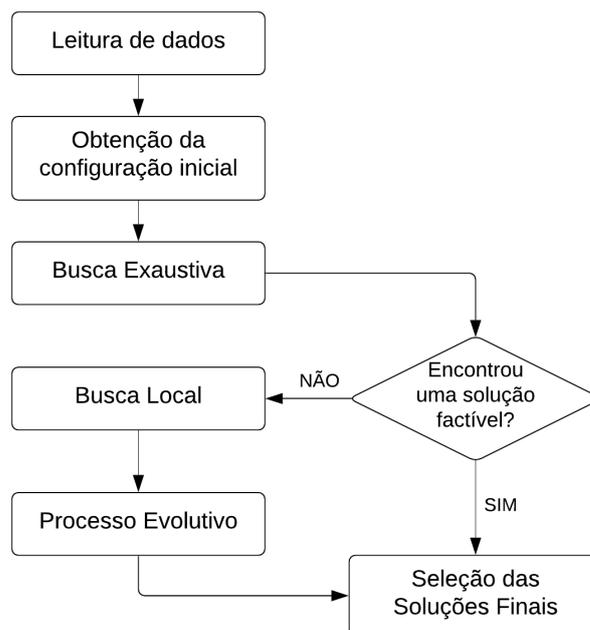


Figura 1. Metodologia Base

primeira parte do problema de restabelecimento abrange identificar o setor em falta e isolá-lo, ou seja, abrir as chaves que os separam do restante do SD. Com o setor em falta identificado e devidamente isolado, os conjuntos de setores restauráveis que ficaram desenergizados são então movidos para RNPs fictícias, estruturas utilizadas para permitir que seja realizado o processo de busca por soluções. As porções ainda energizadas continuam armazenadas nas RNPs que foram inicializadas na etapa anterior.

#### 3.3 Busca Exaustiva

A Busca Exaustiva (BE) consiste numa estratégia determinística que considera todas as chaves NAs diretamente conectadas aos grupos de setores restauráveis e aos setores energizados, chamadas em Miu et al. (2000) de chaves NAs do *Tier 1*, chaves da primeira vizinhança da região problema. Mais especificamente, essa BE possibilita a geração e avaliação de todas as configurações envolvendo apenas manobras em chaves NAs do *Tier 1*. Se pelo menos uma dessas configurações for factível (atende a todas as restrições do problema), o processo é finalizado e essa configuração é indicada como solução do problema. Caso contrário, todas as configurações geradas serão armazenadas em tabelas para formação da população inicial de indivíduos a serem analisados no processo evolutivo. Vale destacar que a BE procura apenas por soluções (PREs) capazes de restaurar todos os setores desligados restauráveis, que, de acordo com a literatura, são chamadas de soluções de restabelecimento completo.

#### 3.4 Busca Local

A Busca Local (BL) é uma busca “pseudo-exaustiva” a ser realizada após a BE e antes do processo evolutivo da metodologia base. Nessa busca estão envolvidas todas as

chaves NAs do *Tier 1* (consideradas na BE) e todas as chaves NFs do *Tier 1* que conectem setores restauráveis entre si. As configurações geradas (ou indivíduos na terminologia de algoritmos evolutivos) nessa etapa servirão para, em conjunto com as geradas nas etapas anteriores, preencher as tabelas de subpopulações usadas no processo evolutivo, podendo ainda servir, eventualmente, como soluções finais. O funcionamento e os artifícios usados pela BL, para torná-la viável em aplicações em tempo real, são apresentados detalhadamente em Fernandes (2019). Vale destacar que a BL possibilita a obtenção de soluções de restauração parcial, ou seja, soluções que não contemplam o restabelecimento de todos os setores restauráveis.

### 3.5 Processo Evolutivo

Esta etapa consiste na aplicação de um AEMT que busca por configurações factíveis com menores valores de ENS e número de manobras. Assim como qualquer algoritmo evolutivo, o AEMT é um algoritmo computacional pertencente a uma classe de métodos regidos por princípios evolutivos oriundos do mundo biológico que, baseados na teoria da evolução darwiniana, tentam simular o processo de evolução natural (Deb, 2001) a fim de obterem a solução para um determinado problema.

A característica fundamental de um AEMO é a estratégia usada para selecionar o subconjunto de soluções ranqueado por mais de uma função objetivo. Para isso é muito comum empregar o conceito de dominância de Pareto, a fim de comparar duas soluções factíveis de um problema. O AEMT trabalha com várias subpopulações em paralelo armazenadas em tabelas, onde os melhores indivíduos para cada característica do problema são armazenados em suas respectivas subpopulações, sendo um total de 26 tabelas com diferentes objetivos (Marques, 2018). O indivíduo selecionado para reprodução pode ser proveniente de qualquer subpopulação ou tabela. Essa estratégia de seleção aumenta a diversidade entre os indivíduos que se reproduzem de forma que as características de um indivíduo de uma subpopulação possam migrar para as demais subpopulações da tabela. Em consequência, aumenta-se a possibilidade de o algoritmo escapar de ótimos locais, aproximando-se de soluções com avaliações próximas de um ótimo global na fronteira Pareto-ótima (Sanches et al., 2014).

### 3.6 Seleção das Soluções Finais

Após o encerramento do processo evolutivo são selecionados os indivíduos factíveis dentre as tabelas de subpopulação para comporem uma aproximação do conjunto Pareto-ótimo resultante da execução da metodologia base. Esta seleção por não-dominância é realizada com base nos valores de energia total não suprida e no número total de manobras em chaves remotas e manuais. A partir dessa aproximação do conjunto Pareto-ótimo, três indivíduos são selecionados para tornarem-se soluções finais do problema, os quais serão informados aos operadores da rede juntamente com a sequência de chaveamento associada.

## 4. METODOLOGIA PROPOSTA

Nesta seção serão apresentadas as considerações para a inclusão do relé de sobrecorrente no problema de restabelecimento e o cálculo das correntes de curto-circuito.

### 4.1 Corrente de falta

As correntes de curto-circuito foram calculadas conforme Kindermann (1997), considerando a tensão de 1 p.u. e resistência de falta igual a zero (curto-circuito franco). O sistema é representado considerando que os circuitos elétricos são transpostos e simétricos, e utilizando o circuito de sequência positiva, negativa e zero. As Equações 2, 3, 4 e 5 representam, respectivamente, o cálculo de curtos-circuitos trifásico, bifásico, bifásico com envolvimento da terra e monofásico. As situações de faltas foram aplicadas em cada barra de cada alimentador e a cada modificação da topologia do SD, novos cálculos foram realizados.

$$I_{falta_{3\phi}} = \frac{1}{Z_1} \quad (2)$$

$$I_{falta_{2\phi}} = \frac{1}{Z_1 + Z_2} \quad (3)$$

$$I_{falta_{2\phi t}} = \frac{1}{Z_1 + Z_2 \setminus \setminus Z_0} \quad (4)$$

$$I_{falta_{1\phi}} = \frac{1}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (5)$$

Onde,  $Z_1$  é a impedância de sequência positiva,  $Z_2$  e sequência negativa e  $Z_0$  de sequência zero.

### 4.2 Relé de Sobrecorrente

O relé de sobrecorrente tem como grandeza de atuação a corrente do sistema elétrico medida no seu ponto de instalação, usualmente em SDs radiais, no início de cada alimentador. Desse modo, quando a corrente do sistema ultrapassa um valor igual ou superior ao ajuste previamente definido (corrente de *pick-up*), um sinal é enviado ao disjuntor para que o mesmo isole parte do SD contendo a situação de falta evidenciada. A atuação do relé pode ser classificada em: instantânea, ou temporizada a tempo definido, ou ainda, a tempo inverso. A Figura 2 apresenta as curvas de operação dos relés de sobrecorrente.

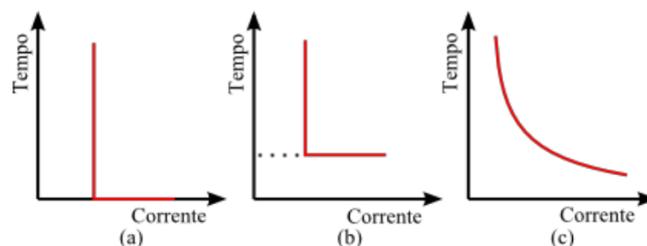


Figura 2. Curva de operação de um relé de sobrecorrente: (a) Instantânea; (b) Tempo definido; (c) Tempo inverso.

## 5. RESULTADOS

Os relés de sobrecorrente instantâneos tem como função identificar as faltas mais severas e eliminá-las instantaneamente, com intuito de reduzir os danos causados ao sistema elétrico. Os relés de sobrecorrente temporizados são classificados em tempo definido e tempo inverso. O relé de tempo definido necessita de uma corrente de *pick-up* e um tempo de atuação, logo, quando uma corrente do sistema ultrapassa a corrente de ajuste, inicia-se a contagem do tempo. Quando esse tempo é igual ao tempo pré-estabelecido, o relé envia o sinal de trip para o disjuntor operar. Além disso, para esse relé, o tempo é independente do valor da corrente de falta. Para o relé de tempo inverso, o tempo de atuação é inversamente proporcional ao valor da corrente, ou seja, para valores menores o tempo de atuação é maior, e para valores maiores o tempo de atuação é menor. A Equação 5 representa o cálculo do tempo de atuação do relé de sobrecorrente de tempo inverso.

$$t_a = \frac{k_1}{\frac{I_{falta}}{I_{ajuste}} k_2 - k_3} * MT \quad (6)$$

Sendo  $t_a$  o tempo de atuação do relé,  $I_{falta}$  a corrente de falta,  $I_{ajuste}$  a corrente de ajuste (*pick-up*) do relé,  $MT$  é o múltiplo de tempo e os valores de  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  são dados pela Tabela 1. Essas constantes definem as curvas, que segundo a norma IEC 60255-3, podem ser classificadas como: Inverso Padrão; Muito Inverso; Extremamente Inverso; Inverso Tempo-Curto; e Inverso Tempo-Longo.

Tabela 1. Curvas existentes pela norma IEC 60255-3.

Nome da Curva	$k_1$	$k_2$	$k_3$
Inverso Padrão	0,14	0,02	1,00
Muito Inverso	13,50	1,00	1,00
Extremamente Inverso	80,00	2,00	1,00
Inverso Tempo-Curto	0,05	0,04	1,00
Inverso Tempo-Longo	12,00	1,00	1,00

Neste artigo foi utilizada a curva do relé de sobrecorrente com tempo definido para correntes altas. Para o relé de fase, a corrente de ajuste foi definida igual a 10 vezes a corrente máxima do circuito. Já para o relé de neutro, a corrente de ajuste de neutro é igual a 80% da máxima corrente de falta calculada para a configuração de pré-falta, sendo o tempo de atuação de 0,05 segundos. No caso das correntes menores foi utilizado a curva Muito Inverso para o relé de sobrecorrente de tempo inverso, onde a corrente de ajuste considerada é de 80% da mínima corrente de falta para neutro e fase calculadas para a configuração de pré-falta. Essas parametrizações ocorreram para cada alimentador presente no sistema, considerando a configuração inicial de pré-falta. Com as correntes de ajuste definidas, incluiu-se uma verificação para cada nova configuração para verificar se o relé de sobrecorrente continuaria atuando de forma correta. Caso contrário, a configuração é penalizada e não pode ser escolhida como indivíduo final, tornando-se infatível.

Para a avaliação do método proposto, foram simulados casos de faltas no SD, representados na Figura 3, composto por 53 setores, 3 subestações, 6 alimentadores, 53 barras e 61 chaves manuais, com um carregamento máximo da rede de 75,2%, queda máxima de tensão de 2,8% e carregamento máximo da subestação (um transformador) de 76,7% (Romero et al., 2016; Marques, 2018; Fernandes, 2019). O tempo de manobra considerado para a chave manual foi de 25 minutos, com o tempo total estimado de 4 horas para que a falta seja plenamente corrigida (Romero et al., 2016; Zidan and El-Saadany, 2012). O limite máximo de queda de tensão foi de 10%. A quantidade de gerações a ser processada pelo método proposto, incluindo a BL e a etapa evolutiva foi de 40.000 gerações. Sendo escolhidas no máximo três soluções finais dentre os indivíduos presentes nas 26 tabelas de subpopulação, como foi explicado na seção 3.6. No sistema em questão foram consideradas as impedâncias de sequência positiva iguais a de sequência negativa, e as impedâncias de sequência zero igual à três vezes a sequência positiva.

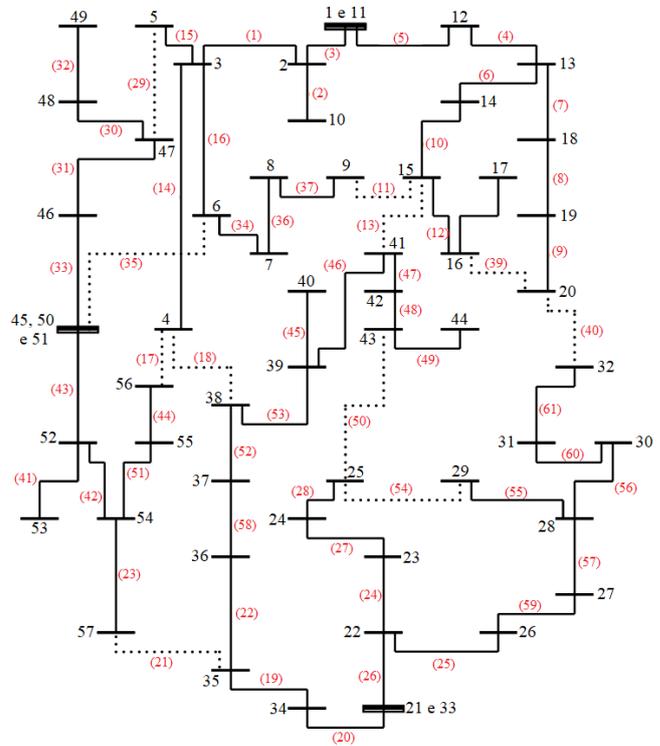


Figura 3. Sistema de Distribuição Teste (Adaptado de Romero et al. (2016)).

Na Figura 3 os números vermelhos entre parênteses representam o número da chave, enquanto, os números pretos representam os setores. Nota-se que os setores em negrito possuem mais que um número e deve-se ao fato de que cada alimentador necessita de um único setor como setor de origem. Portanto, as subestações foram divididas proporcionalmente ao número de alimentadores presentes, sendo que essa modificação não prejudica a análise ou o fluxo de potência. Foram escolhidas três situações de faltas para ilustrar o desempenho da metodologia proposta, nos setores 12, 22 e 34, sendo faltas severas que afetam um

alimentador completo. Conforme dito anteriormente, na sessão 4.1, foram calculadas faltas trifásicas, bifásicas e monofásicas com resistência de falta igual a zero em todas as barras a cada nova configuração encontrada.

### 5.1 Caso 1 - Setor 12

A falta no setor 12 é responsável por interromper a energização de cargas de um alimentador inteiro. As Tabelas 2 e 3 mostram os resultados obtidos nas simulações para a metodologia base. Nas tabelas estão presentes as seqüências de chaveamento de cada solução final, onde as chaves estão em ordem para serem manobradas pelo operador. Caso apareçam um par de manobras, primeiro realiza-se a abertura da chave e depois o fechamento. Além disso, nessas tabelas observa-se também a ENS total ( $(kW_{3\phi})$ ), o número total de manobras ( $\psi$ ) e o PNS total ( $(kW_{3\phi})$ ) ao final de cada manobra realizada. Ao analisar as correntes mínimas de curto-circuito do Alimentador 3 (início no setor 21) para as duas configurações encontradas, observou-se que a corrente de curto mínima na fase foi de 1.660 (A) e no neutro de 727 (A). Na configuração inicial as correntes eram 2.154 (A) e 978 (A), respectivamente. Portanto, para os indivíduos encontrados, nota-se que caso ocorressem essas faltas, o relé não atuaria para faltas mínimas no Alimentador 3.

Tabela 2. Seqüência de manobras da solução 1 para o Caso 1 da metodologia base.

Abrir	Fechar	ENS(G)	$\psi(G)$	PNS(G)
5	-	-	-	-
4	-	29.660,40	2	7.415,1
8	-	29.660,40	3	7.415,1
-	40	27.396,60	4	6.444,9
10	-	27.396,60	5	6.444,9
12	-	27.396,60	6	6.444,9
-	11	25.970,18	7	5.128,2

Tabela 3. Seqüência de manobras da solução 2 para o Caso 1 da metodologia base.

Abrir	Fechar	ENS(G)	$\psi(G)$	PNS(G)
5	-	-	-	-
4	-	29.660,40	2	7.415,1
8	40	27.396,60	4	6.444,9

As soluções encontradas ao incluir as restrições da atuação do relé de sobrecorrente para fase e neutro estão presentes nas Tabelas 4, 5 e 6. As correntes máximas de curto-circuito do Alimentador 1 (início no setor 1) para a primeira solução permaneceram as mesmas e a corrente mínima para fase, que antes era de 2.298 (A) reduziu para 2.024 (A), causando a atuação no relé em 6,69s. Já para neutro foi de 1.039 (A) para 898 (A), causando atuação em 8,40s. Para os indivíduos 2 e 3 as correntes de curto-circuito permaneceram as mesmas, sendo a atuação em 2,7s. Para o Alimentador 3, não houve mudanças para a solução 1. Para as soluções 2 e 3 as correntes mínimas sofrem mudanças para proteção de fase, de 2.154 para 2.015 (A), causando atuação do relé em 3,98s e a de para

Tabela 4. Seqüência de manobras da solução 1 para o Caso 1 da metodologia proposta.

Abrir	Fechar	ENS(G)	$\psi(G)$	PNS(G)
5	-	-	-	-
4	-	29.660,40	2	7.415,1
10	-	29.660,40	3	7.415,1
12	-	29.660,40	4	7.415,1
-	11	27.136,73	5	6.098,4

Tabela 5. Seqüência de manobras da solução 2 para o Caso 1 da metodologia proposta.

Abrir	Fechar	ENS(G)	$\psi(G)$	PNS(G)
5	-	-	-	-
4	-	29.660,40	2	7.415,1
10	-	29.660,40	3	7.415,1
12	-	29.660,40	4	7.415,1
-	11	27.136,73	5	6.098,4
9	40	26.611,20	7	5.613,3

Tabela 6. Seqüência de manobras da solução 3 para o Caso 1 da metodologia proposta.

Abrir	Fechar	ENS(G)	$\psi(G)$	PNS(G)
5	-	-	-	-
4	-	29.660,4	2	7.415,1
9	40	28.528,5	4	6.930,0

neutro, de 978 (A) para 905 (A), causando atuação em 4,30s.

Essa mudança no tempo de atuação do relé ocorre devido a mudança do grupo de setores que é transferido para o Alimentador 3. Para a metodologia base havia a abertura da chave 8, transferindo os setores 19 e 20 para o alimentador 3, enquanto na metodologia proposta ocorre a abertura da chave 9, transferindo somente o setor 20, como se pode observar na Figura 3. Além disso, observa-se que a ENS aumentou em relação a metodologia base. No entanto, essa mudança não foi tão drástica.

### 5.2 Caso 2 - Setor 22

A falta no setor 22 também é responsável por interromper cargas de um alimentador completo e os resultados obtidos nas simulações para a metodologia base estão presentes nas Tabelas 7, 8 e 9. As correntes de curto-circuito mínimas das soluções 1 e 3 passaram de 2.678 (A) para 1.891 (A) na fase e de 1.247 (A) para 832 (A) no neutro no Alimentador 1. Já para solução 2 a corrente mínima de fase passou para 1.718 (A) e de neutro para 748 (A), também, para o Alimentador 1. Logo, essas correntes mínimas não causariam a atuação correta do relé de sobrecorrente, uma vez que, são menores que as correntes de *pick-up*, pré-fixadas para 80% do menor valor da corrente de curto.

A Tabela 10 apresenta a única solução encontrada na metodologia proposta, onde as correntes de curto-circuito não foram modificadas em nenhum alimentador, garantindo assim a sensibilização do relé no caso de falta simulada.

Tabela 7. Sequência de manobras da solução 1 para o Caso 2 da metodologia base.

Abrir	Fechar	$ENS(G)$	$\psi(G)$	PNS(G)
26	-	-	-	-
25	-	-	-	-
24	-	32.432,40	3	8.108,1
56	-	32.432,40	4	8.108,1
-	40	29.643,08	5	6.652,8
28	-	29.643,08	6	6.652,8
-	50	28.592,03	7	5.682,6

Tabela 8. Sequência de manobras da solução 2 para o Caso 2 da metodologia base.

Abrir	Fechar	$ENS(G)$	$\psi(G)$	PNS(G)
26	-	-	-	-
25	-	-	-	-
24	-	32.432,4	3	8.108,1
57	-	32.432,4	4	8.108,1
55	-	32.432,4	5	8.108,1
-	40	29.002,05	6	5.821,2
28	-	29.002,05	7	5.821,2
-	50	28.355,25	8	4.851,0

Tabela 9. Sequência de manobras da solução 3 para o Caso 2 da metodologia base.

Abrir	Fechar	$ENS(G)$	$\psi(G)$	PNS(G)
26	-	-	-	-
25	-	-	-	-
24	-	32.432,40	3	8.108,1
56	40	29.643,08	5	6.652,8

Observa-se novamente que a ENS aumentou em relação aos casos encontrados pela metodologia base. Entretanto, não houve um aumento muito significativo.

Tabela 10. Sequência de manobras da solução 1 para o Caso 2 da metodologia proposta.

Abrir	Fechar	$ENS(G)$	$\psi(G)$	PNS(G)
26	-	-	-	-
25	-	-	-	-
24	-	32.432,40	3	8.108,1
28	-	32.432,40	4	8.108,1
-	50	30.572,85	5	7.137,9

### 5.3 Caso 3 - Setor 34

As Tabelas 11, 12 e 13 apresentam as soluções encontradas na metodologia base para o Caso 3, com uma falta no setor 34, causando desligamento de um alimentador completo. Neste caso, a metodologia base não afetou a sensibilização do relé de sobrecorrente em nenhum alimentador. No entanto, uma nova solução foi encontrada na metodologia proposta, como mostra a Tabela 14, onde as soluções 1 e 3 permaneceram as mesmas.

Tabela 11. Sequência de manobras da solução 1 para o Caso 3 da metodologia base.

Abrir	Fechar	$ENS(G)$	$\psi(G)$	PNS(G)
20	-	-	-	-
19	-	36.313,2	2	9.078,3
47	-	36.313,2	3	9.078,3
52	-	36.313,2	4	9.078,3
-	13	27.413,93	5	4.435,2
-	50	24.919,13	6	2.772,0

Tabela 12. Sequência de manobras da solução 2 para o Caso 3 da metodologia base.

Abrir	Fechar	$ENS(G)$	$\psi(G)$	PNS(G)
20	-	-	-	-
19	-	36.313,2	2	9.078,3
48	-	36.313,2	3	9.078,3
53	-	36.313,2	4	9.078,3
-	13	27.281,1	5	4.365,9
-	50	26.033,7	6	3.534,3
22	21	25.202,1	8	2.286,9
-	18	24.630,38	9	0

Tabela 13. Sequência de manobras da solução 3 para o Caso 3 da metodologia base.

Abrir	Fechar	$ENS(G)$	$\psi(G)$	PNS(G)
20	-	-	-	-
19	-	36.313,2	2	9.078,3
46	13	27.743,1	4	5.405,4

Tabela 14. Sequência de manobras da solução 2 para o Caso 3 da metodologia proposta.

Abrir	Fechar	$ENS(G)$	$\psi(G)$	PNS(G)
20	-	-	-	-
19	-	36.313,2	2	9.078,3
47	50	32.432,4	4	7.415,1
53	13	26.611,2	6	3.534,3
22	18	25.086,6	8	1.247,4
-	21	24.774,75	9	0

## 6. CONCLUSÃO

Este artigo propôs um AEMO em tabelas de subpopulação para resolver o problema de restauração de serviço considerando um relé de sobrecorrente em cada alimentador. Os testes realizados em um SD comprovaram as principais contribuições desta metodologia proposta e mostraram que a consideração de dispositivos de proteção afetam os resultados encontrados (mesmo que aumentem um dos objetivos a ser reduzido).

A proteção é um aspecto muito importante para análise do restabelecimento de energia, uma vez que, deve garantir que a próxima configuração será factível e segura no caso da ocorrência de uma nova falta no sistema. Houveram

resultados onde a metodologia base afetou a sensibilidade do relé de sobrecorrente. Logo, a inclusão da restrição do relé de sobrecorrente modificou alguns resultados sem afetar drasticamente a energia não suprida. Portanto, uma análise do sistema de proteção é necessária para o restabelecimento de energia, uma vez que as mudanças na topologia modificam os níveis de curtos-circuitos dos alimentadores, podendo prejudicar a atuação correta dos dispositivos.

Trabalhos futuros visam considerar diferentes dispositivos de proteção além do relé de sobrecorrente, como por exemplo, religadores automáticos e fusíveis, além de considerar a coordenação entre esses dispositivos. Ademais, levar em consideração a possibilidade de proteção adaptativa para não prejudicar o restabelecimento de energia. Outro aspecto importante para o problema de restabelecimento que afeta diretamente a proteção é a inclusão da presença de geração distribuída no SD.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade de São Paulo (USP) e às agências de fomento CAPES (processo n° 88887.510860/2020-00) e CNPq (processo n° 134387/2018-0).

#### REFERÊNCIAS

- Camillo, M.H., Fanucchi, R.Z., Romero, M.E., et al. (2016). Combining exhaustive search and multi-objective evolutionary algorithm for service restoration in large-scale distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 134, 1–8.
- Carrano, E.G., Da Silva, G.P., Cardoso, E.P., and Takahashi, R.H. (2016). Subpermutation-Based Evolutionary Multiobjective Algorithm for Load Restoration in Power Distribution Networks. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 20(4), 546–562.
- Deb, K. (2001). *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. John Wiley and Sons, Inc., New York, NY, USA.
- Delbem, A.C.B., Carvalho, A., Policastro, C.A., et al. (2004). Node-Depth Encoding for Evolutionary Algorithms Applied to Network Design. 678–687. Springer Berlin Heidelberg.
- Fernandes, J.P.R. (2019). *Restabelecimento de Energia com Corte Seletivo de Carga e Busca Local*. Master's thesis, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Kindermann, G. (1997). *Curto Circuito*. Sagra Luzzatto.
- Marques, L.T. (2018). *Restabelecimento de energia em sistemas de distribuição considerando aspectos práticos*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Marques, L.T., Delbem, A.C.B., and London, J.B.A. (2018). Service restoration with prioritization of customers and switches and determination of switching sequence. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(3), 2359–2370.
- Miu, K.N., Chiang, H.D., and McNulty, R.J. (2000). Multi-tier service restoration through network reconfiguration and capacitor control for large-scale radial distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(3), 1001–1007.
- Mohammadi, F. and Afrakhte, H. (2012). Optimal load restoration in distribution network using intentional islanding. *Journal of Electrical Engineering*, 12, 1–6.
- Romero, R., Franco, J.F., Leao, F.B., et al. (2016). A New Mathematical Model for the Restoration Problem in Balanced Radial Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(2), 1259–1268.
- Sanches, D.S., London, J.B.A., Delbem, A.C.B., et al. (2014). Multiobjective evolutionary algorithm with a discrete differential mutation operator developed for service restoration in distribution systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 62, 700 – 711.
- Shen, F., Wu, Q., Xu, Y., et al. (2020). Hierarchical service restoration scheme for active distribution networks based on admm. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 118, 105809.
- Shin, D.J., Kim, J.O., Kim, T.K., et al. (2004). Optimal service restoration and reconfiguration of network using Genetic-Tabu algorithm. *Electric Power Systems Research*, 71(2), 145–152.
- Zidan, A. and El-Saadany, E.F. (2012). A cooperative multiagent framework for self-healing mechanisms in distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(3), 1525–1539.
- Zidan, A., Khairalla, M., Abdrabou, A.M., et al. (2017). Fault detection, isolation, and service restoration in distribution systems: State-of-the-art and future trends. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(5), 2170–2185.