

Proteção Adaptativa Considerando o Problema de Restabelecimento de Energia em Sistemas de Distribuição

Jullian C. Zan* 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: jullian@usp.br, etiane@usp.br, coury@sc.usp.br, olesk@sc.usp.br, jbalj@sc.usp.br).*

Abstract: The solution to the restoration problem consists of minimizing the network switching looking for a new configuration, respecting all operational restrictions, and reconnecting the most significant number of consumers who were left without service due to a permanent fault. Many techniques that deal with this problem present solutions with a low computational time and consider the practical characteristics of real large networks. However, few papers in the literature consider the protection functions and restrictions in service restoration problems. From this perspective, this paper proposes to incorporate the protection functions of the phase and neutral overcurrent relay in the base methodology of a Multiobjective Evolutionary Algorithm in Tables (AEMT). However, the paper will not treat the protection system as a constraint of the problem, preventing reasonable solutions from being selected. Thus an adaptive approach is considered in this paper, that is, adapting the protection system to the new network configurations when they violate the protection restrictions of the system. The observed results were promising, and the importance of incorporating the protection functions into the problem was observed considering the adaptive approach.

Resumo: A solução para esse problema consiste, basicamente, em minimizar os chaveamentos da rede buscando uma nova configuração, respeitando todas as restrições operacionais e religando o maior número possível de consumidores que ficaram sem atendimento devido a uma falta permanente. Muitas técnicas que tratam o problema apresentam soluções com um baixo tempo computacional e consideram as características práticas das redes reais de grande porte. Entretanto, poucos trabalhos da literatura consideram as funções e restrições da proteção no problema de restabelecimento de energia. Nesta perspectiva, este trabalho propõe incorporar as funções de proteção do relé de sobrecorrente de fase e neutro na metodologia base de um Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo em Tabelas (AEMT). Contudo, o artigo não irá tratar o sistema de proteção como uma restrição do problema, impedindo que boas soluções sejam selecionadas. Assim, considera-se neste trabalho uma abordagem adaptativa, ou seja, adaptando o sistema de proteção para as novas configurações da rede, quando estas violarem as restrições de proteção do sistema. Os resultados observados foram promissores e observou-se a importância de incorporar as funções de proteção dentro do problema considerando a abordagem adaptativa.

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

Palavras-chaves: Proteção Adaptativa; Restabelecimento de Energia; Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo; Sistema de Distribuição.

1. INTRODUÇÃO

A confiabilidade é um fator cada vez mais exigido nos Sistemas de Distribuição (SDs). Muitas são impostas às concessionárias de distribuição de energia elétrica quando ocorrem violações nos indicadores de continuidade. Entretanto, interrupções no fornecimento de energia elétrica nos

SDs são inevitáveis, em virtude, principalmente, da ocorrência de faltas permanentes causadas pelos mais diversos motivos, como, por exemplo, descargas atmosféricas, quedas de árvores, animais, entre outros.

Nesse contexto, para reduzir o custo das compensações das concessionárias e aumentar a satisfação dos consumidores, vários estudos vêm sendo realizados para tratar do problema de Restabelecimento de Energia (RE) em SDs (Shen et al., 2020).

* 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).

A reconfiguração de redes é a forma mais usual para tratar desse problema. Esta abordagem utiliza-se da mudança da topologia do SD por meio de operações em chaves seccionadoras Normalmente Abertas (NAs) e Normalmente Fechadas (NFs). Desse modo, as metodologias visam encontrar uma solução por meio da reconfiguração de redes com o intuito de: *i*) minimizar o número de chaveamentos da rede; *ii*) respeitar as restrições operacionais do sistema elétrico e; *iii*) religar o maior número possível de unidades consumidoras que ficaram sem atendimento devido à falta permanente. Neste trabalho, apenas configurações radiais no SD são consideradas. Haja vista que estas ainda representam as configurações mais comuns na operação dos SDs reais devido sua facilidade na manutenção e operação.

O RE em SDs pode ser definido como um problema de otimização multiobjetivo com múltiplas restrições, onde diversos objetivos são conflitantes entre si, como, por exemplo, a minimização do número de consumidores sem fornecimento e o número de manobras de chaveamento. Além disso, vale destacar que a solução computacional para o problema deve ser encontrada em tempo real para que, posteriormente, a execução em campo do plano de restabelecimento seja realizada por meio dos operadores do SD.

Os métodos desenvolvidos para a solução do problema de RE podem ser divididos em dois grandes grupos: *i*) os baseados em abordagens tradicionais, como os métodos clássicos de programação matemática; e, *ii*) os baseados em técnicas alternativas, ou seja, busca heurística, sistemas especialistas, metas-heurísticas e sistemas multiagentes. A busca por técnicas alternativas é justificada pelas dificuldades encontradas pelas abordagens tradicionais em representar o SD real, com milhares de linhas, barras e chaves seccionadoras, e também, a necessidade 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 da programação matemática em SDs de grande porte.

Dentre as metodologias desenvolvidas para o problema, destacam-se as baseadas em técnicas metas-heurísticas, especialmente os algoritmos evolutivos. Dessa forma, o presente artigo irá tratar como metodologia base o Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo em Tabelas (AEMT) (Marques et al., 2018), uma vez que, esta metodologia representa o SD de uma maneira eficaz, conservando a natureza multiobjetivo do problema e apresenta excelentes soluções com um baixo tempo computacional.

Destaca-se que muitas das técnicas empregadas para o problema consideram as características práticas de um SD real, como a consideração de todas as linhas e barras sem simplificação, classificação das chaves seccionadoras controladas manualmente e remotamente, bancos de capacitores, reguladores de tensão, etc. Entretanto, poucos trabalhos consideram as funções e restrições da proteção no SD.

Os poucos trabalhos que abordam as funções de proteção no RE em SDs tratam o assunto de uma forma restritiva, isto é, caso uma solução encontrada venha violar algum aspecto da proteção, esta solução candidata será impedida de ser a solução final do problema (Carvalho et al., 2021; Vieira et al., 2021; Vieira, 2020).

Dessa maneira, o presente trabalho trata o problema de RE em SDs considerando as funções de proteção de sobrecorrente de fase e neutro no AEMT utilizando a abordagem de proteção adaptativa. Assim, caso haja uma reconfiguração do sistema e a proteção fique comprometida, a proteção vigente será trocada por uma mais adequada.

2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA

Para tratar computacionalmente o problema de RE em SDs utiliza-se a formulação matemática apresentada na 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 Δ_{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 $X(G^e) = MAX\{x_j/\bar{x}_j\}$, 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 $B(G^e) = MAX\{b_s/\bar{b}_s\}$, 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 $V(G^e) = MAX\{|v_s - v_k|/v_s\}$, 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 δ é a máxima queda de tensão admissível ($\delta = 0, 1$, isto é, 10% (Marques, 2018)); e $seq(G)$ 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} (configuração de pré falta).

Além da formulação matemática, a maneira que se representa computacionalmente o SD é muito importante para a eficiência na resolução do problema de RE. Portanto, neste trabalho foi utilizada a Representação Nó Profundidade (RNP), uma estrutura de grafo proposta por Delbem et al. (2004). A RNP foi utilizada para representar computacionalmente a parte energizada e não energizada (setores restauráveis) do SD. Além disso, esta estrutura possui, adicionalmente, operadores genéticos que geram apenas configurações radiais. Conseqüentemente, o uso da RNP naturalmente garante uma das restrições da Equação 1.

3. METODOLOGIA BASE

A metodologia base adotada neste artigo foi desenvolvida pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Análise Computacional de Sistemas Elétricos de Potência (LACOSEP) apresentada em (Carvalho, 2020). Baseado no Método de Tabelas (Benayoun et al., 1971), essa metodologia faz uso de um AEMT (Marques et al., 2018) e é dividida em 5 etapas, conforme apresentadas no fluxograma da Figura 1. As etapas serão explicadas nas próximas subseções.

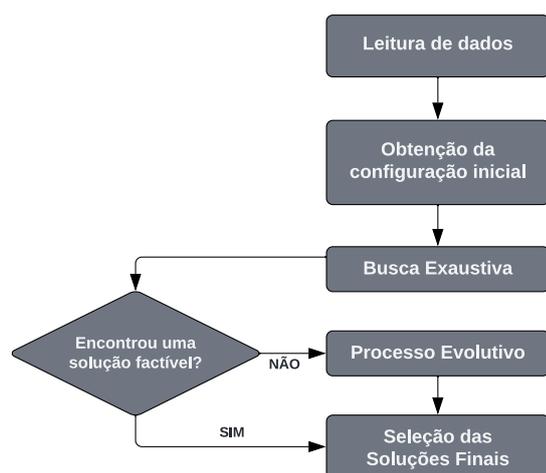


Figura 1. Fluxograma da Metodologia Base. (Adaptada de (Carvalho et al., 2021)).

3.1 Leitura de dados

Nesta etapa, a execução da metodologia base inicia-se pela obtenção das informações da rede primária de distribuição em sua configuração pré-falta (G^{pf}), como, dados da topologia, localização e tipo de cada chave, demanda de potência ativa e reativa das cargas, entre outros.

Além dos parâmetros pré-falta, é necessário, também, a leitura do setor em falta da rede. Durante este processo, a metodologia armazena a topologia da rede primária em RNPs.

3.2 Obtenção da configuração inicial

A primeira parte do problema de RE implica em isolar o setor em falta, ou seja, abrir as chaves à montante e à jusante que o ligam com os demais setores.

A medida que o setor em falta é devidamente isolado, os conjuntos de setores saudáveis, que se encontram à jusante do setor em falta e desenergizados, são então movidos para RNPs fictícias. Estas estruturas fictícias são utilizadas para permitir que seja realizado o processo de busca para o restabelecimento desses setores. Os conjuntos energizados continuam armazenados nas RNPs inicializadas na etapa de leitura de dados.

3.3 Busca Exaustiva

A busca exaustiva consiste em uma abordagem determinística que considera a possibilidade de fechamento de chaves seccionadoras NAs adjacentes aos setores desenergizados à jusante à falta.

O processo de busca exaustiva resulta em diversas soluções candidatas ao problema de RE. Se uma dessas configurações for factível, ou seja, uma configuração que atende a todas as restrições do problema, o processo é finalizado e essa configuração é escolhida como solução final para o problema. Caso contrário, todas as configurações geradas serão armazenadas em tabelas para formação da população inicial de indivíduos que serão posteriormente utilizados na etapa do processo evolutivo.

3.4 Processo Evolutivo

Um algoritmo evolutivo pertence a uma classe de métodos regidos por princípios evolutivos oriundos do mundo biológico que, baseado na teoria da evolução darwiniana, tenta simular o processo de evolução natural (Deb, 2001).

A etapa do processo evolutivo consiste na aplicação do AEMT em busca de configurações factíveis, ou seja, soluções candidatas que respeitem as restrições operacionais do SD e mantenha a radialidade da rede. Além disso, dentre estas configurações factíveis, a metodologia tenta minimizar simultaneamente os valores de ENS e o número de manobras das chaves seccionadoras.

Basicamente, o processo evolutivo consiste na abertura e fechamento das chaves seccionadoras gerando novas configurações de rede a partir da configuração inicial. Estas novas configurações, também chamadas de indivíduos, buscam minimizar o número de consumidores que estão a jusante da falta. O processo de abertura e fechamento das chaves seccionadoras é realizado através de operadores genéticos da RNP (Delbem et al., 2004).

Cada novo indivíduo é avaliado pela execução de um fluxo de carga de varredura direta-inversa. O fluxo de carga permite calcular as características elétricas da rede e, posteriormente, avaliar as restrições operacionais da mesma.

As configurações geradas pelo algoritmo evolutivo são armazenadas em tabelas, onde os melhores indivíduos para cada característica do problema são armazenados e ranqueados em suas respectivas tabelas, sendo aplicado neste trabalho um total de 26 tabelas com diferentes objetivos (Marques, 2018).

O indivíduo selecionado para o processo evolutivo pode ser proveniente de qualquer tabela, escolhido de forma aleatória. Essa estratégia de seleção aumenta a diversidade entre

os novos indivíduos. Assim, aumenta-se a possibilidade de o algoritmo escapar de ótimos locais, aproximando-se de soluções finais com avaliações próximas de um ótimo global.

Por fim, o processo evolutivo possui um critério de parada. Este critério refere-se ao número máximo de gerações de novos indivíduos. Neste artigo foi adotado o número de 40.000 gerações.

3.5 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

Para a inclusão das funções de proteção no AEMT, houve a necessidade de algumas alterações na metodologia base. Assim, nesta etapa, detalha-se como foram realizados os cálculos das correntes de curto-circuito, e, como foram incluídos os relés de sobrecorrente de fase e neutro no SD, de acordo com (Carvalho et al., 2021). Além disso, uma abordagem adaptativa foi implementada para o sistema de proteção. Assim, caso haja uma reconfiguração do sistema e a proteção fique comprometida, a proteção vigente será trocada por uma mais adequada.

4.1 Cálculo das Correntes de Curto-circuito

As correntes de curto-circuito foram calculadas considerando uma tensão de 1 p.u. nas barras e resistência de falta nula. Além disso, o SD é representado considerando que as linhas são transpostas e simétricas. As equações 2, 3, 4 e 5 representam os cálculos das correntes de curto-circuito trifásico, bifásico, bifásico-terra e monofásico, respectivamente.

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

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

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

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

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

As equações de falta descritas acima foram aplicadas em cada barra do SD da configuração pré-falta. Além disso, para cada nova topologia da rede, gerada durante as etapas de busca exaustiva e processo evolutivo, novos cálculos de curtos-circuitos foram realizados nos alimentadores modificados.

4.2 Relés de Sobrecorrente

Geralmente, em SDs, os relés de sobrecorrente são inseridos no início de cada alimentador. Seu princípio de funcionamento consiste em enviar um sinal de *trip* para a abertura do disjuntor quando a corrente monitorada ultrapassar um certo valor de ajuste (corrente de *pick-up*), previamente definido.

Os relés de sobrecorrente podem ser classificados em três grupos: *i*) instantâneo (corrente definida); *ii*) tempo definido; e *iii*) tempo inverso. Existe também um quarto tipo, com características combinadas de tempo inverso e instantâneo. As classificações dos relés de sobrecorrente são apresentadas na Figura 2.

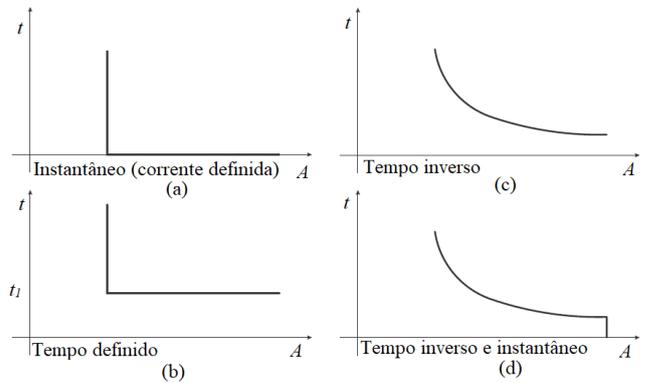


Figura 2. Classificação dos Relés de Sobrecorrente: (a) Instantâneo (corrente definida); (b) Tempo definido; (c) Tempo inverso; (d) Tempo inverso e instantâneo (Adaptado de (Gers et al., 2011)).

A curva instantânea, Figura 2 (a), tem como objetivo parametrizar os curtos-circuitos mais severos e eliminá-los instantaneamente. Os relés de sobrecorrente temporizados podem ser classificados em tempo definido e tempo inverso. A curva do relé de tempo definido, Figura 2 (b), necessita de um tempo de atuação pré-estabelecido (t_1). Assim, quando uma corrente ultrapassa o valor de ajuste, inicia-se a contagem de tempo, e caso este tempo seja superior ao pré-estabelecido, o relé envia um sinal de *trip* para a abertura do disjuntor. Por fim, para o relé de sobrecorrente de tempo inverso, Figura 2 (c), o tempo de atuação é inversamente proporcional ao valor da corrente. Esta característica é apresentada na Equação 6.

$$t_a = \frac{k_1}{\frac{I_{falta}}{I_{ajuste}}^{k_2} - k_3} \cdot DT \quad (6)$$

Onde t_a é o tempo de atuação do relé, I_{falta} é a corrente de falta, I_{ajuste} é a corrente de ajuste do relé, DT é o múltiplo de tempo e os valores de k_1 , k_2 e k_3 são constantes apresentadas na Tabela 1.

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

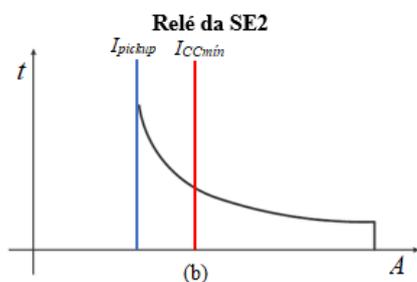
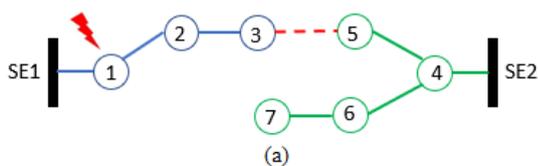


Figura 3. Configuração pré-falta: (a) Grafo do SD; (b) Curva do Relé da SE2.

Neste trabalho foi utilizada a curva de tempo inverso juntamente com a instantânea, Figura 2 (d). As constantes são da curva de tempo muito inverso, segunda linha da Tabela 1.

A corrente de ajuste da curva de tempo inverso foi definida como sendo 80% da mínima corrente de falta do alimentador (calculada nas equações de 2 a 5), tanto para o relé de fase, quanto para o relé de neutro. A corrente de ajuste da curva instantânea foi definida igual a 10 vezes a corrente máxima da linha, para o relé de fase. Já para o relé de neutro, a corrente de ajuste instantânea é igual a 80% da máxima corrente de falta do alimentador. Vale destacar que estes ajustes e cálculos são realizados em cada alimentador para a configuração pré-falta do SD.

4.3 Violações nas Funções de Proteção

As Figuras 3 e 4 representam um exemplo das violações nas funções de proteção dentro do problema de RE em SDs. A Figura 3 (a) indica um SD contendo dois alimentadores representado por um grafo onde as circunferências representam os setores e as linhas que ligam os setores indicam as chaves seccionadoras, as linhas preenchidas são as chaves NFs e as linhas tracejadas, as chaves NAs. Observando a curva do relé de sobrecorrente da subestação 2, Figura 3 (b), nota-se que a corrente de *pick-up* (linha vertical em azul) é definida como sendo 80% da menor corrente de curto-circuito deste alimentador, conforme explanado na subseção anterior.

Quando ocorre uma falha permanente no setor 1, este setor é isolado através da abertura das chaves a montante e a

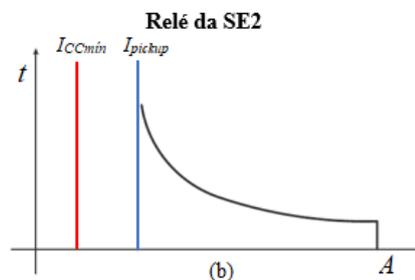
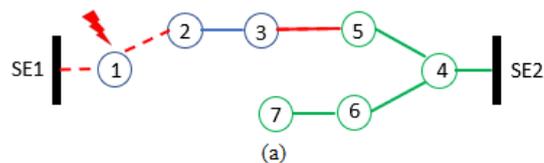


Figura 4. Configuração de pós-restabelecimento: (a) Grafo do SD; (b) Curva do Relé da SE2.

jusante do mesmo, Figura 4 (a). Entretanto, os setores 2 e 3 podem ser restabelecidos através do fechamento da chave seccionadora entre os setores 3 e 5 (chave destacada em vermelho).

Devido a este incremento de cargas na subestação 2, o valor da corrente de curto-circuito mínima (linha vertical em vermelho), Figura 4 (b), passa a ser inferior a corrente de *pick-up* deste alimentador, ou seja, caso ocorra uma nova falha permanente em um setor distante do alimentador 2, o relé de sobrecorrente não irá atuar, identificando assim, uma violação na função de proteção dentro do problema de RE.

4.4 Proteção Adaptativa

Entendidas as violações nas funções de proteção explanadas na subseção anterior, a metodologia proposta traz uma abordagem adaptativa para o problema. A proteção adaptativa irá reajustar as correntes de *pick-up* para as configurações que violaram as restrições de proteção. Dessa forma, não será necessário eliminar uma solução de RE que violou as restrições de proteção.

A abordagem para a proteção adaptativa deste artigo pode ser dividida em 4 etapas: *i*) faltas devem ser simuladas em cada setor do SD teste, e, então, a metodologia base (AEMT) ser executada para cada simulação; *ii*) analisar em quais faltas simuladas ocorreram violações nas funções de proteção; *iii*) parametrizar novos grupos de ajuste nos relés de sobrecorrente que sofreram a violação, e, por fim, *iv*) os operadores do SD devem adaptar a proteção para o grupo de ajuste de acordo com a nova topologia da rede.

5. RESULTADOS

A metodologia proposta foi aplicada a um SD de pequeno porte proposto em (Romero et al., 2016). A Figura 5 apresenta o sistema teste estudado neste artigo. O sistema possui 57 barras, 3 subestações, 6 alimentadores e 61 chaves seccionadoras de manobra. Os números em vermelho representam a identificação das chaves, ao passo que, os números em preto representam os setores. Os setores em negrito são os setores conectados às subestações,

comumente chamados de setores raiz. Os alimentadores estão ordenados de acordo com os números dos setores. O alimentador 1 possui os setores de 1 a 10, o alimentador 2 os setores de 11 a 20, o alimentador 3 os setores de 21 a 33, o alimentador 4 os setores de 33 a 44, o alimentador 5 os setores de 45 a 49, e, por fim, o alimentador 6 possui os setores de 50 a 57. Algumas simplificações foram feitas no sistema teste para um melhor entendimento e uma melhor análise das funções e violações de proteção. Cada setor foi composto por uma única barra, foram consideradas apenas chaves seccionadoras manuais e não foram incluídos consumidores especiais, como hospitais, escolas, etc., consumidores estes que necessitariam de restabelecimento prioritário.

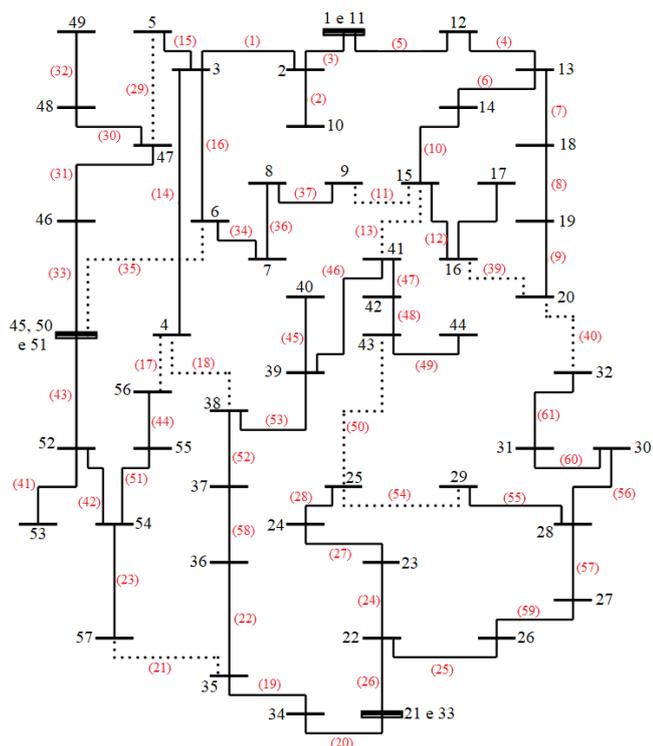


Figura 5. Sistema de Distribuição Teste (Adaptado de Romero et al. (2016)).

O SD teste, apresentado na Figura 5, possui em sua configuração pré-falta um carregamento máximo da rede de 75,2%, queda máxima de tensão de 2,8% e carregamento máximo da subestação de 76,7%. Vale ressaltar que foram considerados relés de sobrecorrente de fase e neutro no início de cada um dos 6 alimentadores.

A Tabela 2 apresenta as correntes de ajustes (A) dos relés de sobrecorrente para a configuração pré-falta.

Onde $I_{máx}^F$ é a maior corrente de falta envolvendo fase, $I_{mín}^F$ é a menor corrente de falta envolvendo fase, I_{aj}^F é a corrente *pick-up* para ajuste do relé de sobrecorrente de fase, $I_{máx}^N$ é a maior corrente de falta envolvendo neutro, $I_{mín}^N$ é a menor corrente de falta envolvendo neutro e I_{aj}^N é a corrente *pick-up* para ajuste do relé de sobrecorrente de neutro. Vale lembrar que os ajustes dos relés de fase e neutro (considerando a curva de tempo inversa) são calculados como sendo 80% da menor corrente de falta.

Tabela 2. Ajustes dos Relés de Sobrecorrente (Configuração pré-falta)

Alimentador	$I_{máx}^F$	$I_{mín}^F$	I_{aj}^F	$I_{máx}^N$	$I_{mín}^N$	I_{aj}^N
Alim. 1	12.465	2.298	1.838	4.042	1.039	832
Alim. 2	12.465	2.678	2.142	4.042	1.247	997
Alim. 3	11.321	2.154	1.723	3.680	978	783
Alim. 4	11.321	2.179	1.743	3.680	996	797
Alim. 5	8.525	2.542	2.034	2.788	1.283	1.027
Alim. 6	8.525	2.604	2.083	2.788	1.329	1.063

Para obtenção dos resultados, foi simulado uma falta permanente em cada setor, contabilizando um total de 57 simulações, e executada a metodologia proposta.

Analisando os resultados gerais pós-simulação, observou-se que 15,79% dos casos simulados sofreram violações nas funções de proteção.

Com relação ao desempenho da metodologia base (AEMT), observou-se que 28,07% das soluções foram encontradas através do processo evolutivo, 26,32% encontradas pela busca exaustiva, e, 45,61% não apresentaram soluções por se tratar de uma falta no setor mais distante do alimentador (setor folha), falta no setor raiz, ou ainda, faltas em setores que não possuem chaves adjacentes para restauração.

As violações de proteção ocorreram apenas nos relés dos alimentadores 2 e 3. Assim, novos grupos de ajustes foram parametrizados nestes relés para a aplicação da proteção adaptativa. As Tabelas 3 e 4 indicam os grupos de ajustes para os relés de sobrecorrente.

Tabela 3. Grupos de Ajuste - Relé do Alimentador 2

	Fase	Neutro
Grupo de Ajuste 1 (Pré-falta)	2.142 A	997 A
Grupo de Ajuste 2	1.571 A	695 A
Grupo de Ajuste 3	1.513 A	666 A
Grupo de Ajuste 4	1.374 A	598 A
Grupo de Ajuste 5	2.142 A	795 A

Tabela 4. Grupos de Ajuste - Relé do Alimentador 3

	Fase	Neutro
Grupo de Ajuste 1 (Pré-falta)	1.723 A	783 A
Grupo de Ajuste 2	1.328 A	581 A

5.1 Caso 1 - Falta no setor 12

Considera-se uma falta permanente no setor 12. Todos os setores a jusante deste setor, pertencem ao alimentador 2. Estes setores são saudáveis e ficaram sem fornecimento de energia elétrica devido a ocorrência da falta. O AEMT é executado para buscar uma solução para restabelecer estes setores saudáveis e sem fornecimento. A Tabela 5, apresenta a sequência de chaveamentos da solução final indicando o número de manobras e a redução da

Tabela 5. Solução Final para o RE considerando uma falta no setor 12

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

ENS total ($kWh_{3\phi}$) para cada chaveamento do plano de restabelecimento.

A Tabela 6 apresenta as violações nas funções de proteção de fase e neutro, destacados em vermelho. Observa-se que a corrente mínima de falta da solução final é menor que a corrente de ajuste da configuração pré falta, ou seja, caso uma falta com esse valor de curto-circuito mínimo ocorra, o relé de sobrecorrente não irá atuar. Assim, em azul são apresentados os novos ajustes para o relé de sobrecorrente de fase e neutro, para se readaptarem às novas correntes mínimas de falta.

Tabela 6. Violação da Função de Proteção no Relé do Alimentador 3

	Fase		Neutro	
	I_{min} (A)	I_{aj} (A)	I_{min} (A)	I_{aj} (A)
Configuração Pré-falta	2.179	1.723	978	783
Solução Final	1.660	1.328	727	581

Verifica-se que a adaptação da proteção para a solução final representa o grupo de ajuste 2, apresentado na Tabela 4. Portanto, para que a solução final seja efetivamente executada em campo, deve-se primeiramente ajustar a proteção do relé do alimentador 3 para este novo grupo de ajuste, garantindo assim a segurança do sistema de proteção para esta nova topologia da rede.

Comparando este resultado com os resultados apresentados em (Carvalho et al., 2021), nota-se que há uma redução de 2,41% da ENS, ou seja, com a metodologia proposta neste trabalho, um maior número de consumidores é restabelecido. Esta redução acontece, pois, a metodologia indicada em (Carvalho et al., 2021) não considera a abordagem adaptativa da proteção, Carvalho et al. (2021) trata a solução apresentada na Tabela 5 como uma restrição para o problema de RE e não a permite como solução final.

5.2 Caso 2 - Falta no setor 22

A Tabela 7 apresenta a sequência de chaveamentos da solução final indicando o número de manobras e a redução da ENS para cada chaveamento do plano de restabelecimento.

A Tabela 8 mostra as correntes que causam violações nas funções de proteção de fase e neutro, destacadas em vermelho. Em azul são apresentados os novos ajustes para o relé de sobrecorrente de fase e neutro.

Tabela 7. Solução Final para o RE considerando uma falta no setor 22

Abrir	Fechar	$ENS(G)$	$\psi(G)$
26	-	-	1
25	-	-	2
24	-	32.432,40	3
56	-	32.432,40	4
-	40	29.643,08	5
28	-	29.643,08	6
-	50	28.592,03	7

Tabela 8. Violação da Função de Proteção no Relé do Alimentador 2

	Fase		Neutro	
	I_{min} (A)	I_{aj} (A)	I_{min} (A)	I_{aj} (A)
Configuração Pré-falta	2.678	2.142	1.247	997
Solução Final	1.891	1.513	832	666

Pode-se verificar que os novos ajustes de proteção para a solução final representam o grupo de ajuste 3, apresentados na Tabela 3. Portanto, para que a solução final seja efetivamente executada em campo, deve-se primeiramente ajustar a proteção do relé do alimentador 2 para este novo grupo de ajuste. Comparando este resultado com (Carvalho et al., 2021), observou-se uma redução de 6,48% da ENS.

5.3 Caso 3 - Falta no setor 27

Por fim, uma falta permanente foi aplicada ao setor 27. A Tabela 9, apresenta a sequência de chaveamentos da solução final.

Tabela 9. Solução Final para o RE considerando uma falta no setor 27

Abrir	Fechar	$ENS(G)$	$\psi(G)$
59	-	-	1
57	-	11.642,40	2
55	-	11.642,40	3
-	40	6.306,30	4
-	54	5.110,88	5

A Tabela 10 apresenta as violações nas funções de proteção de fase e neutro, destacados em vermelho. Em azul são apresentados os novos ajustes para o relé de sobrecorrente de fase e neutro.

Tabela 10. Violação da Função de Proteção no Relé do Alimentador 2

	Fase		Neutro	
	I_{min} (A)	I_{aj} (A)	I_{min} (A)	I_{aj} (A)
Configuração Pré-falta	2.678	2.142	1.247	997
Solução Final	1.718	1.374	748	598

Pode-se verificar que os novos ajustes de proteção para a solução final representam o grupo de ajuste 4, apresentados na Tabela 3. Portanto, para que a solução final seja efetivamente executada em campo, deve-se primeiramente ajustar a proteção do relé do alimentador 2 para este novo grupo de ajuste.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma abordagem adaptativa para o sistema de proteção de sobrecorrente aplicado ao problema de restabelecimento de energia em sistemas de distribuição radiais. Os testes realizados em um sistema da literatura comprovaram as principais contribuições desta metodologia proposta em comparação com outras abordagens que tratam as funções de proteção de maneira restritiva.

Observa-se que a proteção é um fator muito importante para o problema de restabelecimento, uma vez que, a nova configuração da rede deve ser factível e garantir segurança no caso da ocorrência de uma nova falta no sistema.

A proposta apresentada para o sistema de 57 barras é interessante e aplicável. Observou-se que a metodologia de proteção adaptativa implementada neste trabalho reajustou as correntes de *pick-up* para as configurações que violaram as restrições de proteção. Assim, não houve necessidade de eliminar a melhor solução de RE apresentada pelo AEMT.

Entretanto, a mesma abordagem não é possível para sistemas reais de grande porte. Para estes casos de grande dimensão, é necessário um centro de controle para receber informações da rede. Essas informações são utilizadas para possibilitar novos ajustes em tempo real do sistema de proteção adaptativa (da Silva, 2014). Assim, o AEMT pode fornecer a nova corrente de *pick-up* e o sistema de proteção adaptativa parametriza os relés de sobrecorrente com os novos grupos de ajuste em tempo real.

Como propostas para trabalhos futuros, sugere-se considerar diferentes dispositivos de proteção, como, religadores e chaves fusíveis. Outra sugestão seria considerar as coordenadas entre os dispositivos de proteção e suas restrições no problema de restabelecimento de energia.

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

Benayoun, R., de Montgolfier, J., and Tergny, J. (1971). Linear programming with multiple objective functions: Step method (stem). *Mathematical Programming*, 1(1), 366–375.

Carvalho, E.O.P., Coury, D.V., Oleskovicz, M., and Jr., J.B.A.L. (2021). O problema de restabelecimento da energia em sistemas de distribuição radiais considerando as restrições de proteção. *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI 2021*.

Carvalho, E.O.P. (2020). Restabelecimento de energia em sistemas de distribuição considerando a existência de geração distribuída.

da Silva, K.Q. (2014). Sistema de proteção adaptativa.

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.

Gers, J.M., Holmes, E.J., and of Electrical Engineers., I. (2011). *Protection of electricity distribution networks*. Institution of Electrical Engineers.

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.C.B., and London, J.B. (2018). Service restoration with prioritization of customers and switches and determination of switching sequence. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9, 2359–2370.

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.

Shen, F., Wu, Q., and Xue, Y. (2020). Review of service restoration for distribution networks. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 8, 1–14.

Vieira, A.R. (2020). Incorporação de restrições de proteção ao problema da restauração de serviço em redes radiais de distribuição de energia.

Vieira, A.R., Batista, V.S., Júnior, G.C., and Vieira, J.P.A. (2021). Integrating protection constraints to a mean-based method for service restoration in radial distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 191, 106851.