

# Metodologia para Restabelecimento de Energia em Cenários de Múltiplas Faltas em um Sistema de Distribuição Real de Grande Porte

Gustavo da S. P. Rondon\* Etiane O. P. de Carvalho\* Jullian C. Zan\*  
João Bosco A. London Jr.\* Leandro T. Marques\*\*

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

\*\* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá - MT. (e-mail: leandro.marques@ufmt.br).

---

**Abstract:** Due to the costly permanent faults that frequently occur in distribution systems, switching operations are necessary to reconfigure the distribution electrical network and restore the energy supply to the maximum number of disconnected consumers. Currently, several works available in the literature present computational methods capable of providing solutions to the service restoration problem. However, many of these works do not deal with the possibility of defining partial restoration solutions, as well as having limitations in scenarios of multiple faults. In this context, this paper proposes a methodology for service restoration in real distribution systems. The proposed methodology combines the execution of an evolutionary algorithm with a modified local exhaustive search, allowing the analysis of multiple fault scenarios considering several practical aspects of the problem and the possibility of defining partial restoration solutions when it is not possible to reconnect all consumers. The methodology was tested in situations of up to four simultaneous faults and proved capable of providing a variety of solutions for the most critical scenarios of multiple faults.

**Resumo:** Em função das onerosas ocorrências de faltas permanentes que frequentemente ocorrem nos sistemas de distribuição, são necessárias operações de manobra nas chaves disponíveis no sistema com o objetivo de reconfigurar a rede e restabelecer o fornecimento de energia ao máximo de consumidores que foram desligados em função da falta. Atualmente, diversos trabalhos disponíveis na literatura apresentam métodos computacionais capazes de fornecer soluções para o problema de restabelecimento de energia. Contudo, muitos desses trabalhos não tratam a possibilidade de se definir soluções de restauração parcial, bem como possuem limitações em cenários de múltiplas faltas simultâneas. Nesse contexto propõe-se, neste artigo, uma metodologia destinada ao restabelecimento de energia para sistemas de distribuição reais. A metodologia proposta combina a execução de um algoritmo evolutivo com uma busca exaustiva local modificada, permitindo a análise de cenários de faltas múltiplas, levando-se em consideração diversos aspectos práticos do problema e a possibilidade de se definir soluções de restauração parcial quando não for possível reconectar todos os consumidores. A metodologia foi testada em situações de até quatro faltas simultâneas e se mostrou capaz de fornecer uma diversidade de soluções para os cenários mais críticos de faltas múltiplas.

*Keywords:* Local Exhaustive Search, Multi-objective Evolutionary Algorithm, Multiple Faults, Service Restoration, Distribution Systems.

*Palavras-chaves:* Busca Exaustiva Local, Algoritmo Evolutivo Multi-objetivo, Múltiplas Faltas, Restabelecimento de energia, Sistemas de Distribuição.

---

## 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de distribuição (SDs) são, normalmente, operados em uma configuração radial devido à maior simpli-

\* Os autores agradecem à Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), à Universidade de São Paulo (USP) e às agências de fomento CAPES (processo n° 88887.822316/2023-00), CNPq (processo n° 314439/2021-8) e FAPEMAT (processos n° FAPEMAT.0393990/2021, FAPEMAT.0001465/2022 e FAPEMAT-PRO-2022/01047).

cidade para a coordenação dos dispositivos de proteção, operação e minimização das correntes de falta (Zidan et al., 2016). Contudo, tal configuração faz com que os SDs possuam uma baixa confiabilidade, uma vez que a ocorrência de falhas em qualquer componente da rede causará uma interrupção no fornecimento de energia para todas as cargas localizadas à jusante do setor<sup>1</sup> defeituoso. (Zidan et al., 2016).

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

Tais interrupções são onerosas, causando diversos impactos econômicos, como danos a equipamentos e matéria-prima, perdas de produção, além de impactos sociais, como temperaturas desconfortáveis no ambiente de trabalho e nos lares e risco para a saúde e segurança (Linares and Rey, 2013). Portanto, para a redução dos prejuízos, realiza-se uma mudança na topologia do SD, através de manobras em chaves normalmente fechadas (NF) e normalmente abertas (NA) disponíveis na rede, a fim de transferir os consumidores saudáveis<sup>2</sup> desligados a outros alimentadores (Zidan et al., 2016). Tal processo é conhecido como reconfiguração de rede. Entretanto, o restabelecimento de energia (RE) em SDs de grande porte, com milhares de setores e chaves, é uma tarefa muito exigente que depende da experiência dos operadores do sistema e, portanto, envolve riscos devido a erros humanos (Camillo et al., 2016).

Dessa forma, muitas metodologias foram propostas na literatura para auxiliarem na determinação de um adequado plano de restabelecimento. Um plano de restabelecimento corresponde a uma sequência apropriada de chaves a serem operadas sem violar as restrições operacionais da rede, apresentando o mínimo número de manobras e a mínima quantidade de consumidores desligados, os quais, por sua vez, são objetivos conflitantes entre si (Carvalho, 2020).

A busca por um plano de restabelecimento ótimo, portanto, consiste em um problema de otimização combinatorial sujeito à múltiplas restrições (Santos et al., 2010), que pode ser resolvido seguindo uma abordagem tradicional baseada em programação matemática (Romero et al., 2015). Esse tipo de abordagem garante a obtenção de uma solução ótima global do problema, entretanto apresenta dificuldade para modelar algumas características práticas do problema, além de apresentarem certa limitação para aplicação em sistemas de distribuição reais de grande porte em função do tempo de processamento exigido.

Nessa perspectiva, muitos métodos alternativos têm sido propostos nessa área, como os algoritmos meta-heurísticos, dentre os quais pode-se citar os algoritmos evolutivos (Carvalho, 2020). Em (Santos et al., 2010) é proposto um Algoritmo Evolutivo Multi-objetivo (AEMO) em tabelas de subpopulação capaz de lidar com os múltiplos objetivos e restrições característicos do problema de RE. O AEMO apresentado mostrou-se capaz de lidar com SDs de grande porte (Santos et al., 2010), utilizando uma estrutura de dados computacionalmente eficiente intitulada Representação Nó-Profundidade (RNP), por meio da qual os SDs são representados computacionalmente como florestas de grafo (Delbem et al., 2004).

Apesar das vantagens, a metodologia apresentada em (Santos et al., 2010) não considera aspectos eminentemente práticos e importantes do problema. Em (Marques et al., 2017), por outro lado, foi apresentado um AEMO que prioriza a operação em chaves controladas remotamente (CCR), além de considerar diferentes níveis de prioridade entre os consumidores e fornecer uma sequência de chaveamento que evita mais de uma operação em uma mesma chave. Contudo, a metodologia apresentada em (Marques et al., 2017) mostrou-se incapaz de fornecer soluções de

restauração parcial<sup>3</sup>. Entretanto, em (Camillo et al., 2016) é apresentada uma busca exaustiva local (BEL) como um método capaz de melhorar a qualidade das soluções encontradas por AEMOs, a partir da determinação de todas as possibilidades de restabelecimento de energia para todos os setores saudáveis que foram desligados a partir apenas do fechamento de chaves NAs que os conectam a alimentadores energizados.

Nesse sentido, esse artigo propõe uma metodologia mais robusta, que combina a BEL com um AEMO em tabelas de subpopulação que utiliza a RNP. Tal metodologia, além de priorizar operações em CCRs e considerar diferentes níveis de prioridade entre consumidores, é capaz de selecionar cargas menos prioritárias para permanecerem desligadas em situações nas quais não é possível encontrar soluções de restauração completa, definindo como um dos principais objetivos a redução da energia não suprida (ENS).

Ademais, é proposta uma nova BEL, com alterações para sua aplicação mais ampla em situações de múltiplas faltas. Tais casos consistem em duas ou mais regiões fora de serviço e que podem ocorrer em função de condições climáticas severas, como tempestades ou inundações, ou em incêndios em subestações capazes de produzirem as mesmas consequências (Lim et al., 2006). Apesar de serem raros, esses casos provocam maiores impactos à rede. Dessa maneira, diversos cenários de duas, três e quatro faltas simultâneas foram então simulados a fim de validar a metodologia em um SD real de grande porte.

## 2. ENUNCIADO FORMAL

Considerando que um SD operando na forma radial pode ser representado por meio de uma floresta de grafos<sup>4</sup> (Marques et al., 2017), o enunciado formal do problema de RE pode ser representado a partir de (1), baseada na formulação apresentada em Marques et al. (2017). Contudo, é adotado o objetivo de minimizar a ENS em detrimento da quantidade de consumidores saudáveis desligados.

$$\begin{aligned}
 & \text{Min. } \psi_M(G), \psi_R(G), \\
 & \quad \varepsilon_A(G), \varepsilon_I(G), \varepsilon_B(G) \text{ e } \varepsilon_S(G) \\
 & \text{s.a. : } A(G^e)x(G^e) = c(G^e) \\
 & \quad A(G^e)Y_x(G^e)A(G^e)^t v(G^e) = c(G^e) \\
 & \quad X(G^e) \leq 1 \\
 & \quad B(G^e) \leq 1 \\
 & \quad V(G^e) \leq \delta \\
 & \quad G \text{ deve ser uma floresta de grafos} \\
 & \quad G = G^e \cup G^{ne}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Em que  $G$  corresponde a uma configuração radial do SD representada por uma floresta de grafos;  $G^e$  é a porção de  $G$  que se encontra energizada;  $G^{ne}$  é a porção de  $G$  fora de serviço;  $\varepsilon_P(G)$  corresponde à ENS, durante o intervalo de tempo necessário para reparação das falhas, aos setores com prioridade  $P$ , onde  $P = A, I, B$  e  $S$  simboliza o nível de prioridade alta (PA), prioridade intermediária (PI), prioridade baixa (PB) e consumidores sem prioridade (SP), respectivamente;  $\psi_M(G)$  representa o número de manobras em chaves controladas manualmente (CCM)

<sup>3</sup> Soluções em que alguns consumidores saudáveis permanecem desligados durante o tempo de restauração da falha.

<sup>4</sup> Conjunto de grafos acíclicos e conectados.

<sup>2</sup> Consumidores localizados em setores sem falta.

necessárias para a obtenção de  $G$  a partir da configuração pré-falta ( $G^{pf}$ ), a qual corresponde à configuração em operação antes da atuação dos dispositivos de proteção em virtude das faltas;  $\psi_R(G)$  é o número de manobras em CCRs necessárias para a obtenção de  $G$  a partir de  $G^{pf}$ ;  $A(G^e)$  é a matriz de incidência nó-aresta pseudo-orientada de  $G^e$ ;  $x(G^e)$  é o vetor de correntes complexas nas linhas em  $G^e$ ;  $c(G^e)$  corresponde ao 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  $G^e$ ;  $v(G^e)$  configura 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 maior valor de carregamento de transformador (em subestação abaixadora) em  $G^e$ , dado por  $B(G^e) = \text{MAX}\{b_s/\bar{b}_s\}$ , no qual  $\bar{b}_s$  é o limite superior admissível para uma injeção de corrente  $b_s$  provida por um transformador  $s$ ;  $V(G^e)$  é o máximo valor de queda de tensão em  $G^e$ , dado por  $V(G^e) = \text{MAX}\{|v_s - v_k|/v_s\}$ , no qual  $v_s$  é a magnitude de tensão na barra secundária de um transformador  $s$  (em subestação abaixadora),  $v_k$  é a magnitude de tensão numa barra  $k$  de um alimentador do SD e  $\delta$  é a máxima queda de tensão admissível.

A ENS, por sua vez, configura um índice de continuidade que relaciona a potência não suprida (PNS) com o tempo durante o qual o consumidor permanece desligado, sendo de maior interesse prático do que apenas a determinação da quantidade de consumidores desligados. O cálculo da ENS é feito, genericamente, seguindo a seguinte equação:

$$\varepsilon(G) = \sum_{S_i \in G} P_{S_i} \times \Delta t_{S_i} \quad (2)$$

Onde  $P_{S_i}$  corresponde à potência ativa demandada pelo setor  $S_i$ , pertencente a  $G$ , que ficou desligado durante o intervalo de tempo  $\Delta t_{S_i}$ . O maior valor possível que  $\Delta t_{S_i}$  pode assumir equivale ao intervalo de tempo necessário para execução das ações de reparo nos setores em falta.

### 3. METODOLOGIA PROPOSTA

A BEL, proposta em (Camillo et al., 2016), se trata de um método determinístico destinado à obtenção de todas as possibilidades de restauração completa dos setores afetados, conectando-os a alimentadores energizados somente por meio do fechamento de chaves NAs disponíveis na vizinhança das áreas fora de serviço. Portanto, as soluções obtidas demandam apenas manobras de chaveamento destinadas à isolação dos setores em falta e reconexão dos setores saudáveis desligados.

Contudo, em situações de múltiplas faltas nas quais agrupamentos de setores localizados em dois ou mais alimentadores próximos sejam desligados, a busca por chaves NAs que os conectam apenas a alimentadores energizados vizinhos não garante o restabelecimento de energia a todos os consumidores saudáveis. Para ilustrar essa situação, será utilizado como exemplo o sistema apresentado na Figura 1. Na imagem, as linhas contínuas simbolizam as chaves NFs, as linhas tracejadas correspondem às chaves NAs, os números vermelhos entre parênteses retratam a identificação de cada chave ao passo que os elementos circulares representam os setores.

A ocorrência de uma falta múltipla envolvendo os setores 6 e 11<sup>5</sup> produz dois agrupamentos de setores saudáveis desligados<sup>6</sup>, sendo o primeiro constituído pelos setores 7, 8 e 9, enquanto o segundo corresponde aos setores 12 e 13. Nessa situação, não há um alimentador energizado imediatamente disponível para a restauração dos setores 7, 8 e 9, uma vez que a única chave NA disponível é a chave 19, entre os setores 9 e 13. Entretanto, caso as chaves 18 ou 17 sejam fechadas, a energia é restabelecida ao agrupamento dos setores 12 e 13, permitindo que o grupo dos setores 7, 8 e 9 seja então energizado pelo fechamento da já mencionada chave 19. Dessa forma, a ordem de operação das chaves desempenha um papel fundamental na determinação de soluções de restauração completa.

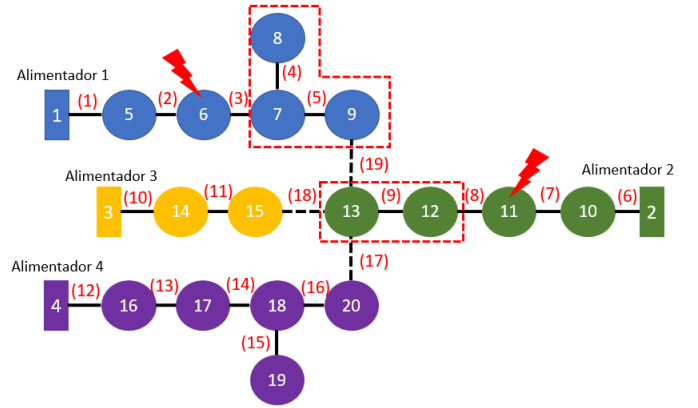


Figura 1. Sistema de distribuição ilustrativo

Nessa perspectiva, este artigo propõe uma nova busca exaustiva local (NBEL). Nela, é necessária uma varredura das chaves NAs presentes na vizinhança dos setores não-energizados e a separação dos agrupamentos de setores desligados em conjuntos  $\Omega_N$ , sendo  $N = 1, 2, \dots, n$ , em que  $n$  simboliza o número total de conjuntos formados. Os agrupamentos do conjunto  $\Omega_1$  são aqueles que possuem chaves NAs em sua vizinhança que os conectam diretamente a alimentadores energizados. Os agrupamentos do conjunto  $\Omega_2$  são aqueles que só podem ser restaurados se os agrupamentos pertencentes a  $\Omega_1$  forem inicialmente energizados. Essa lógica se estende até o  $n$ -ésimo conjunto, constituído de agrupamentos não pertencentes a  $\Omega_{n-1}$ , mas que possuem chaves NAs que os conectam aos agrupamentos de  $\Omega_{n-1}$ . O número de conjuntos formados depende da complexidade do problema tratado. Com isso, a NBEL pode ser estruturada nos seguintes passos:

- (1) Isole todos os setores em falta por meio da abertura das chaves NFs localizadas imediatamente à jusante e a montante de cada um desses setores;
- (2) Faça uma varredura das chaves NAs disponíveis na vizinhança dos setores saudáveis desligados;
- (3) Separe os agrupamentos de setores não-energizados em conjuntos  $\Omega_N$ , sendo  $N = 1, 2, \dots, n$ ;

<sup>5</sup> Falta múltipla composta por duas faltas simples que ocorrem de forma simultânea ou dentro de uma pequena janela de tempo (na prática considera-se, usualmente, janelas de até um minuto).

<sup>6</sup> Setores desligados, localizados à jusante de uma falta, que estejam ligados entre si por chaves NFs

- (4) Dentro de cada conjunto  $\Omega_N$ , sendo  $N = 1, 2, \dots, n$ , ordene os agrupamentos em ordem decrescente do nível de prioridade de seus consumidores;
- (5) Faça uma listagem, para cada agrupamento do conjunto  $\Omega_1$ , de todas as chaves NAs em sua vizinhança que os conectam a alimentadores energizados;
- (6) Faça uma listagem, para cada agrupamento do conjunto  $\Omega_i$ , sendo  $i = 2, 3, \dots, n$ , de todas as chaves NAs em sua vizinhança que os conectam aos agrupamentos do conjunto  $\Omega_{i-1}$ ;
- (7) Liste todas as combinações de manobras de chaveamento possíveis de serem feitas com as chaves listadas. Para cada combinação, ordene as chaves NAs de tal forma que, primeiramente, sejam restaurados os agrupamentos de  $\Omega_1$ , seguindo a ordem de prioridade dos seus respectivos consumidores, seguidos da restauração dos agrupamentos de  $\Omega_2$  e assim sucessivamente;
- (8) Aplique todas as combinações ordenadas de chaves NAs listadas no passo anterior. Cada combinação dará origem a uma nova configuração da rede, isto é, a um novo indivíduo.

Desse modo, primeiro são restaurados os setores que possuem algum alimentador energizado em sua vizinhança, abrindo a possibilidade de restauração daqueles que, no momento da ocorrência da falha, não possuíam alimentadores energizados próximos. Ademais, os setores de maior prioridade são os primeiros a serem restabelecidos dentro de cada conjunto  $\Omega_N$ , reduzindo, dessa forma, a ENS a consumidores prioritários. Com isso, as principais diferenças entre a NBEL e a BEL são:

- (1) A NBEL permite restaurar uma quantidade maior de consumidores, haja vista que a BEL restauraria somente consumidores do conjunto  $\Omega_1$ ;
- (2) A NBEL restaura os consumidores por meio de uma sequência de chaveamento que considera os níveis de prioridade de atendimento. A BEL, por outro lado, não faz distinção entre os consumidores e não se preocupa com a sequência de operação das chaves.

Todas as configurações obtidas são avaliadas, com o intuito de se determinar os valores de  $\varepsilon_P(G)$ , para  $P = A, I, B$  e  $S$ ;  $\psi_C(G)$ , para  $C = M$  e  $R$ ;  $K(G^e)$ , para  $K = X, B$  e  $V$ . Nessa etapa, é empregado um fluxo de carga pelo método de varredura direta/inversa com a RNP (Santos et al., 2008; Marques et al., 2017), o qual demanda tempos menores de processamento mesmo para grandes SDs. Isso é possível pois na RNP as barras do sistema estão sempre organizadas na ordem terminal-subestação, eliminando, dessa forma, a necessidade de algoritmos para reorganizar as barras do sistema dessa maneira (Santos et al., 2008).

Se a NBEL for capaz de encontrar soluções factíveis, ou seja, que respeitem as restrições apresentadas em (1), é escolhida como solução final aquela que possui os menores valores de ENS, dentre as soluções factíveis obtidas, considerando-se os níveis de prioridade de atendimento dos consumidores. Caso não seja possível obter soluções factíveis de restauração completa, as configurações geradas pela NBEL serão utilizadas para compor a população inicial de um AEMO. Portanto, o AEMO possui a finalidade de tratar casos de restauração parcial ou de restauração completa que exigem manobras para alívio de alimentadores.

O AEMO utiliza o conceito de Tabelas de Subpopulação, no qual cada tabela armazena as melhores soluções para um determinado aspecto do problema sem exigir a agregação dos objetivos em uma função com fatores de ponderação (Santos et al., 2010; Marques et al., 2017). A obtenção de um novo indivíduo é realizada a partir de uma seleção randômica de uma das tabelas de subpopulação. Dentro dessa tabela, é escolhida aleatoriamente uma das soluções armazenadas, na qual será aplicada um dos operadores de reprodução. Estes transferem uma subárvore de uma árvore de grafo de origem ( $T_{de}$ ) para uma árvore destino ( $T_{para}$ ) (Delbem et al., 2004), a qual, no contexto dos SDs, simboliza a execução de um par de manobras de chaveamento para transferir um agrupamento de setores de um alimentador a outro.

Em Delbem et al. (2004) são propostos os operadores *Preserve Ancestor Operator* (PAO) e o *Change Ancestor Operator* (CAO). Contudo, na metodologia proposta nesse trabalho é também empregado um terceiro operador, o qual é baseado no PAO e no CAO, contudo, utilizado para transferir setores que se encontram na porção não-energizada  $G^{ne}$  da configuração  $G$  para a porção energizada  $G^e$ . Tal operador possui uma maior prioridade na obtenção de um novo indivíduo, ou seja, caso a solução selecionada nas tabelas possua consumidores desligados, será então restabelecida a energia a esses setores ou ao menos a uma parte deles. Com isso, a metodologia proposta realiza a reconexão gradativa de cargas. O novo indivíduo obtido é então avaliado e, caso sejam desrespeitados os limites operacionais, a nova solução é descartada e o PAO ou o CAO é aplicado no indivíduo selecionado nas tabelas, para a realização de manobras de alívio de alimentador.

Após a definição e avaliação de um novo indivíduo, a sequência de chaveamento necessária para sua obtenção é verificada e, se for necessário, corrigida por meio da estratégia proposta por Marques et al. (2017). Portanto, diferentemente de Marques et al. (2017), a correção da sequência de chaveamento ocorre durante o processo evolutivo e não apenas no final. Para que um indivíduo-filho faça parte de uma tabela, é necessário que a tabela de subpopulação ainda não esteja cheia ou o novo indivíduo seja melhor que a pior solução já presente na tabela, considerando o aspecto do problema avaliado pela tabela em questão (Marques et al., 2017).

Ao se atingir o número máximo de gerações, o processo evolutivo é então encerrado. No entanto, não é apresentado automaticamente um conjunto Pareto-ótimo, o qual corresponde ao conjunto de soluções, envolvendo o espaço de busca total, formado pelas soluções factíveis não dominadas entre si<sup>7</sup> (Carvalho, 2020).

Portanto, os indivíduos factíveis armazenados nas tabelas são separados por grau de dominância, seguindo a estratégia de seleção por não-dominância (Deb et al., 2002), considerando os objetivos do problema apresentados em (1). Após a determinação do conjunto Pareto-ótimo, são selecionadas até três soluções finais, sendo uma com o menor valor de energia total não suprida ( $\varepsilon_T(G)$ ), a solução com o menor valor de total de manobras em chaves

<sup>7</sup> Diz-se que uma solução 'a' domina uma solução 'b' quando 'a' é pelo menos igual a 'b' em todas as funções objetivo e 'a' é superior a 'b' em pelo menos uma função objetivo.

$(\psi_T(G))$  e outra que melhor atenda simultaneamente os valores de  $\varepsilon_T(G)$  e  $\psi_T(G)$ . A metodologia proposta pode então ser resumida no fluxograma apresentado na Fig. 2

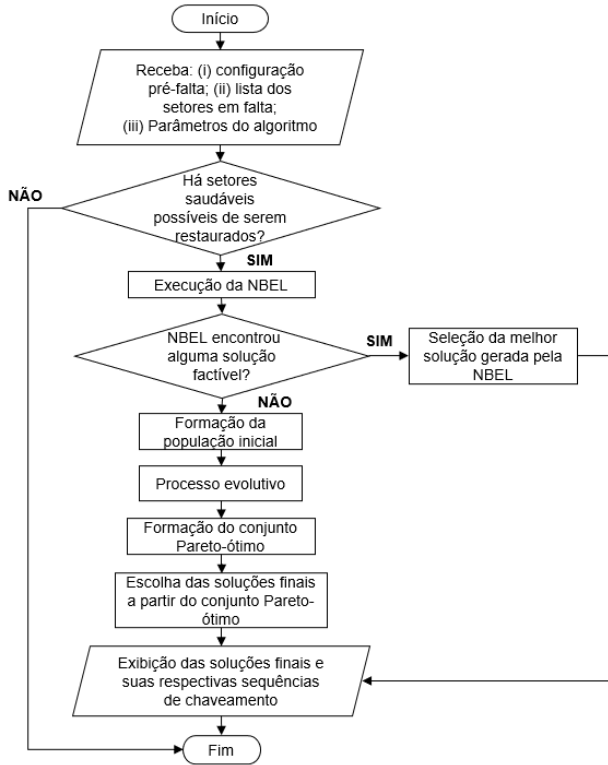


Figura 2. Fluxograma simplificado da metodologia proposta

#### 4. RESULTADOS

Considerando que a metodologia base, apresentada em (Marques et al., 2017), não possui como objetivo a minimização dos valores de ENS, assim como não permite a obtenção de soluções de restauração parcial, não é possível efetuar uma comparação direta entre os resultados obtidos pela metodologia proposta neste artigo e aqueles apresentados em (Marques et al., 2017). Nesse sentido, a fim de avaliar o desempenho da metodologia proposta, foram executadas simulações em duas metodologias distintas. A metodologia 1 consiste na própria metodologia proposta. Na metodologia 2, por outro lado, não será executada a NBEL e a população inicial do AEMO será constituída apenas de dois indivíduos. A primeira configuração pertencente à população inicial do AEMO na metodologia 2 corresponde à configuração na qual os setores faltosos são isolados e nenhuma operação é feita para restauração dos demais setores desligados, a qual será chamada de indivíduo  $G^1$ . A segunda configuração será uma solução de restauração completa obtida pelo fechamento de chaves NAs na vizinhança das áreas afetadas, gerada aleatoriamente de forma similar à metodologia apresentada em (Marques et al., 2017). Dessa forma, na metodologia 2 será avaliado apenas o AEMO sem a NBEL. Nessas simulações, os algoritmos foram codificados em linguagem C e foi utilizado um computador pessoal com processador Intel Core i7-3770 de 3,40 GHz de 32 GB de memória RAM.

Os testes foram realizados no SD da cidade de Londrina-PR em operação no ano de 2014, contendo 68 alimentadores, 3.148 setores, 21.656 barras, sendo 6.982 delas classificadas como prioritárias e 3.580 chaves, das quais 151 são CCRs. Nesse sistema são conhecidos os consumidores prioritários, contudo, não se sabe qual é o nível de prioridade de atendimento entre eles. Dessa forma, foram selecionados aleatoriamente 50% desses consumidores para terem PB, 30% para possuírem PI e 20% para terem PA.

Inicialmente foram selecionados os 20 setores que, em cenários de faltas simples, apresentaram os maiores valores de  $\varepsilon_T$  no indivíduo  $G^1$ . Foram então simuladas combinações de duas, três e quatro faltas simultâneas utilizando os 20 setores mencionados, gerando 190, 1140 e 4845 combinações para cada caso de faltas simultâneas, respectivamente. Na Tabela 1 é exibido o percentual de casos que apresentaram ao menos uma solução factível após a execução da NBEL da metodologia 1. O percentual é calculado com base na quantidade de combinações geradas para cada quantidade de faltas.

Tabela 1. Percentual de casos que apresentaram ao menos uma solução factível encontrada pela NBEL

Nº de faltas	Percentual de casos
1	50%
2	32,11%
3	23,33%
4	16,74%

A quantidade de soluções factíveis encontradas decaiu consideravelmente com o aumento no número de falhas simultâneas. Tal resultado é esperado, uma vez que, caso uma falha em um setor resulte em nenhuma solução que respeite os limites operacionais da rede, diferentes combinações de faltas múltiplas que envolvam o mesmo setor dificilmente apresentarão uma possibilidade factível de restauração completa.

Em posse desses dados, foram então escolhidos 5 cenários para serem solucionados pelas metodologias 1 e 2, os quais são apresentados na Tabela 2. Na Tabela 3, por outro lado, são fornecidos, para cada caso, os dados referentes ao somatório de potência ativa não suprida ( $PNS_P$ ) aos consumidores saudáveis desligados de prioridade  $P$ , sendo  $P = A, I, B$  e  $S$ , além do valor de potência não suprida total ( $PNS_T$ ) para a configuração  $G^1$ , ou seja, para a configuração na qual todos os consumidores permanecem sem fornecimento. São também apresentados os dados de ENS por nível de prioridade e de  $\varepsilon_T$  para a configuração  $G^1$  de cada um dos casos, considerando um tempo total de reparação das falhas de 4 horas/Falta.

Os setores faltosos presentes em cada caso estão próximos das subestações e localizados em alimentadores distintos, de tal forma que a ocorrência de faltas em cada um deles desliga quase todo o alimentador ao qual cada um dos setores está conectado, deixando inúmeros consumidores fora de serviço. Para todos os 5 casos, foram executadas 30 simulações empregando-se tanto a metodologia 1 quanto a metodologia 2 para a resolução do problema. Foi considerado um número máximo de 20.000 gerações para serem executadas pelo AEMO e os valores limites de 10%, 100%

Tabela 2. Casos de faltas múltiplas selecionados para análise

Caso	Nº de faltas	Setores afetados
Caso 1	2	2164 e 2279
Caso 2	2	2163 e 2244
Caso 3	3	2164, 2279 e 2361
Caso 4	3	816, 2163 e 2244
Caso 5	4	1419, 2164, 2279, 2361

Tabela 3. Dados de energia e potência não suprida, por nível de prioridade, para cada caso de faltas múltiplas

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
$\epsilon_A^*$	0	341	437	512	1082
$\epsilon_I^*$	575	1394	1383	3206	1844
$\epsilon_B^*$	528	229	793	343	1070
$\epsilon_S^*$	102812	111602	227452	241139	399172
$\epsilon_T^*$	103916	113565	230064	245199	403168
$PNS_A^{**}$	0	43	36	43	68
$PNS_I^{**}$	72	174	115	267	115
$PNS_B^{**}$	66	29	66	29	67
$PNS_S^{**}$	12852	13950	18954	20095	24948
$PNS_T^{**}$	12990	14196	19172	20433	25198

\*em ( $kWh_{1\phi}$ ); \*\*em ( $kW_{1\phi}$ )

e 100% para  $\delta$ ,  $X(G^e)$  e  $B(G^e)$ , respectivamente. Para avaliação dos testes, foi considerado o tempo de execução da ferramenta, a qualidade e ocorrência das soluções.

#### 4.1 Resultados do caso 1

Os resultados experimentais obtidos nas simulações do caso 1 estão presentes na Tabela 4, a qual exibe as soluções finais que foram apresentadas pelos algoritmos na maioria dos testes realizados. Na primeira, segunda, terceira e quarta linha da Tabela 4 estão indicados, respectivamente, a metodologia utilizada, a identificação da solução obtida, a origem da configuração e a quantidade de vezes que a solução foi obtida dentre as 30 simulações.

Nota-se que, na metodologia 1, em virtude da NBEL ter sido capaz de encontrar soluções de restauração completa, em todas as execuções foram apresentadas apenas uma solução final, a qual possui os menores valores de ENS seguindo os níveis de prioridade dos consumidores. Na metodologia 2, por outro lado, foram obtidas duas soluções finais na grande maioria das execuções. Analisando os indivíduos 2.b e 1.a, observa-se que em quase todas as simulações o AEMO foi capaz de encontrar uma solução de restauração completa idêntica à melhor solução obtida pela NBEL, além de apresentar uma opção alternativa de restauração parcial que demanda uma manobra a menos em uma CCM.

A NBEL apresentou a vantagem de garantir a obtenção da melhor solução de restauração completa em um tempo de execução consideravelmente inferior. Além disso, observando os valores de  $X(G)$ ,  $V(G)$  e  $B(G)$ , verifica-se que as soluções fornecidas por ambas metodologias respeitaram os limites operacionais.

Tabela 4. Resultados experimentais do caso 1

	Metodologia 1		Metodologia 2	
	1.a	2.a	2.b	
<b>Indivíduo</b>				
<b>Origem</b>	NBEL	AEMO	AEMO	
<b>Ocorrência</b>	30 de 30	27 de 30	27 de 30	
$\epsilon_A$ [%]*	0	0	0	
$\epsilon_I$ [%]*	16	16	16	
$\epsilon_B$ [%]*	21	100	21	
$\epsilon_S$ [%]*	18	56	18	
$\psi_M$	4	3	4	
$\psi_R$	2	2	2	
$PNS_A$ [%]*	0	0	0	
$PNS_I$ [%]*	0	0	0	
$PNS_B$ [%]*	0	100	0	
$PNS_S$ [%]*	0	48	0	
$X$ [%]	99,84	97,36	99,84	
$V$ [%]	4,55	4,55	4,55	
$B$ [%]	75,17	75,17	75,17	
<b>Tempo médio</b>	0,04 s	19,16 s		

\* % do respectivo valor em  $G^1$ , apresentado na Tabela 3

#### 4.2 Resultados do caso 2

Os resultados experimentais do caso 2 encontram-se na Tabela 5. Considerando que, nesse caso, não foi possível identificar soluções de restauração completa, todas as configurações obtidas por ambas metodologias são de restauração parcial. A solução 1.a possui o menor número total de manobras, contudo, houve redução nenhuma nos valores de  $\epsilon_A$  e  $\epsilon_B$ , ou seja, todas as cargas de PA e PB permaneceram desligadas. A solução 1.c, por sua vez, executa três manobras a mais em CCMs, em comparação com 1.a, entretanto, nota-se que o valor de  $PNS_S$  é de 4% , indicando uma redução de 96% no valor de PNS em comparação com  $G^1$ , ou seja, apenas algumas poucas cargas menos prioritárias foram mantidas desligadas. A solução 1.b, por fim, apresenta valores de ENS e  $\psi_T$  intermediários entre 1.a e 1.c.

Tabela 5. Resultados experimentais do caso 2

	Metodologia 1			Metodologia 2		
	1.a	1.b	1.c	2.a	2.b	2.c
<b>Indivíduo</b>						
<b>Origem</b>	AEMO	AEMO	AEMO	AEMO	AEMO	AEMO
<b>Ocorrência</b>	27 de 30	26 de 30	25 de 30	28 de 30	28 de 30	27 de 30
$\epsilon_A$ [%]*	100	27	27	100	27	27
$\epsilon_I$ [%]*	65	22	22	65	22	22
$\epsilon_B$ [%]*	100	27	27	100	27	27
$\epsilon_S$ [%]*	60	35	25	60	35	25
$\psi_M$	3	5	6	3	5	6
$\psi_R$	3	3	3	3	3	3
$PNS_A$ [%]*	100	0	0	100	0	0
$PNS_I$ [%]*	59	0	0	59	0	0
$PNS_B$ [%]*	100	0	0	100	0	0
$PNS_S$ [%]*	52	18	4	52	18	4
$X$ [%]	97,36	97,36	97,36	97,36	97,36	97,36
$V$ [%]	4,55	4,55	4,55	4,55	4,55	4,55
$B$ [%]	75,17	75,17	75,17	75,17	75,17	75,17
<b>Tempo médio</b>	16,60 s			18,37 s		

\* % do respectivo valor em  $G^1$ , apresentado na Tabela 3

Observa-se que as três soluções mais recorrentes nas execuções da metodologia 2 são idênticas àquelas encontradas pela metodologia 1. Logo, por meio da análise da Tabela 5, verifica-se que, diante da impossibilidade de se obter uma solução de restauração completa operando apenas chaves NAs, a execução apenas do AEMO se mostrou suficiente para encontrar soluções de restauração parcial.

#### 4.3 Resultados do caso 3

Os resultados experimentais do caso 3 estão expressos na Tabela 6. Comparando as soluções 1.a e 2.c, constata-se que, em um caso de três faltas, o AEMO ainda foi capaz de encontrar uma solução de restauração completa idêntica à melhor solução obtida pela NBEL, apesar da ocorrência dessa solução ser inferior e ser obtida em um tempo de execução maior. Contudo, ainda assim, o tempo de execução da ferramenta é compatível com as necessidades práticas do problema de RE.

Tabela 6. Resultados experimentais do caso 3

	Metodologia 1		Metodologia 2	
Indivíduo	1.a	2.a	2.b	2.c
Origem	NBEL	AEMO	AEMO	AEMO
Ocorrência	30 de 30	25 de 30	25 de 30	25 de 30
$\epsilon_A$ [%]*	14	100	14	14
$\epsilon_I$ [%]*	14	46	14	14
$\epsilon_B$ [%]*	18	100	100	18
$\epsilon_S$ [%]*	15	70	42	15
$\psi_M$	5	4	4	5
$\psi_R$	4	3	4	4
$PNS_A$ [%]*	0	100	0	0
$PNS_I$ [%]*	0	38	0	0
$PNS_B$ [%]*	0	100	100	0
$PNS_S$ [%]*	0	65	33	0
$X$ [%]	99,84	97,36	97,36	99,84
$V$ [%]	4,82	4,55	4,82	4,82
$B$ [%]	82,96	79,98	82,96	82,96
Tempo médio	0,56 s		21,06 s	

\* % do respectivo valor em  $G^1$ , apresentado na Tabela 3

#### 4.4 Resultados do caso 4

Na Tabela 7 são exibidos os resultados experimentais do caso 4 apenas para a metodologia 1, destacando as soluções finais mais recorrentes, além de um exemplo de soluções encontradas em poucas simulações, mas que possuem qualidade superior àquelas encontradas mais frequentemente.

Nota-se que a ocorrência das soluções é muito baixa, mostrando o quão desafiador é esse cenário de três faltas não solucionado pela NBEL, uma vez que o AEMO não foi capaz de convergir em ótimas soluções. Ao longo das simulações foi apresentada uma enorme variedade de soluções finais, sendo a grande maioria dessas configurações dominadas pelas soluções mais recorrentes apresentadas na Tabela 7, ou seja, possuíam valores maiores tanto de ENS quando de  $\psi_T$ .

Tabela 7. Resultados experimentais do caso 4

	Metodologia 1			
Indivíduo	1.a	1.b	1.c	1.d
Origem	AEMO	AEMO	AEMO	AEMO
Ocorrência	18 de 30	7 de 30	7 de 30	1 de 30
$\epsilon_A$ [%]*	21	32	35	25
$\epsilon_I$ [%]*	70	44	29	26
$\epsilon_B$ [%]*	21	32	35	25
$\epsilon_S$ [%]*	81	48	31	29
$\psi_M$	6	9	11	11
$\psi_R$	2	3	3	3
$PNS_A$ [%]*	0	0	0	0
$PNS_I$ [%]*	62	23	0	0
$PNS_B$ [%]*	0	0	0	0
$PNS_S$ [%]*	76	29	3	3
$X$ [%]	85,97	97,36	97,36	97,36
$V$ [%]	2,13	4,55	4,55	4,55
$B$ [%]	65,86	75,17	75,17	78,37
Tempo médio	19,13 s			

\* % do respectivo valor em  $G^1$ , apresentado na Tabela 3

Em poucas execuções ainda foram obtidas configurações melhores dos que as de maiores ocorrências, como é possível observar a solução 1.d, encontrada em apenas uma das 30 simulações. A configuração 1.d possui o mesmo valor de  $\psi_T$  do indivíduo 1.c, entretanto, apresenta um valor de ENS inferior em todos os níveis de prioridade, demonstrando que a sequência de chaveamento de 1.d obteve um maior sucesso em priorizar o restabelecimento de energia aos agrupamentos de setores saudáveis desligados de maior prioridade. Um comportamento análogo foi observado nas soluções obtidas pela metodologia 2, indicando, possivelmente, a necessidade de se aumentar a quantidade máxima de gerações executadas ao longo do processo evolutivo. Contudo, apesar desse cenário se mostrar desafiador e afetar a convergência da ferramenta, a metodologia não se restringiu à busca pelo restabelecimento de energia à todas as cargas e ofereceu opções de restauração parcial em um baixo tempo de execução computacional.

#### 4.5 Resultados do caso 5

Os resultados experimentais do caso 5 estão expressos na Tabela 8. Apenas duas soluções finais foram encontradas na maioria das simulações utilizando a metodologia 2, sendo ambas de restauração parcial. Tal resultado, assim como o anterior, evidencia a dificuldade de se tratar casos com uma grande quantidade de faltas e o impacto produzido na eficiência do AEMO.

A solução 2.c corresponde a única solução de restauração completa encontrado pelo AEMO, a qual foi obtida em apenas uma das 30 execuções. Ainda assim, a configuração 2.c encontrada pelo AEMO da metodologia 2 é pior que a melhor solução de restauração completa obtida pela NBEL, a qual corresponde ao indivíduo 1.a. Nota-se que os valores de  $\epsilon_A$  e  $\epsilon_S$  de 1.a são inferiores aos valores de  $\epsilon_A$  e  $\epsilon_S$  da solução 2.c, sendo que 1.a e 2.c possuem o mesmo número de manobras. Ou seja, em situações em que é possível restaurar todos os setores saudáveis desligados

Tabela 8. Resultados experimentais do caso 5

Indivíduo	Metodologia 1		Metodologia 2	
	1.a	2.a	2.b	2.c
Origem	NBEL	AEMO	AEMO	AEMO
Ocorrência	30 de 30	20 de 30	25 de 30	1 de 30
$\epsilon_A$ [%]*	13	53	53	15
$\epsilon_I$ [%]*	13	67	13	13
$\epsilon_B$ [%]*	16	100	17	16
$\epsilon_S$ [%]*	14	79	35	15
$\psi_M$	6	5	6	6
$\psi_R$	6	4	5	6
$PNS_A$ [%]*	0	46	46	0
$PNS_I$ [%]*	0	62	0	0
$PNS_B$ [%]*	0	100	1	0
$PNS_S$ [%]*	0	76	24	0
$X$ [%]	99,84	91,76	91,76	99,84
$V$ [%]	4,82	4,82	4,82	4,82
$B$ [%]	82,96	82,96	82,96	82,96
Tempo médio	7,99 s	24,11 s		

\* % do respectivo valor em  $G^1$ , apresentado na Tabela 3

operando apenas chaves NAs, a NBEL não só garante a obtenção dessa solução como também consegue definir uma sequência de chaveamento apropriada que prioriza o atendimento de cargas prioritárias em todas as execuções.

## 5. CONCLUSÃO

Em função da busca por uma metodologia mais robusta para o tratamento do problema de RE em sistemas reais, envolvendo o processo de reconfiguração de redes, nesse artigo foi proposta uma metodologia que, além de priorizar o restabelecimento de energia para cargas prioritárias e operação em CCRs, é capaz de encontrar soluções de restauração parcial dos setores afetados. Foi adotado como um dos objetivos do problema a minimização da ENS, que configura um índice de continuidade de maior interesse prático por levar em consideração o tempo que os consumidores permanecem desligados. Ademais, foi proposta uma nova BEL, com a finalidade de considerar os diferentes níveis de prioridade entre consumidores e possuir uma aplicação mais ampla em situações de múltiplas faltas.

A fim de avaliar a metodologia proposta, diferentes testes foram realizados nos casos mais críticos de duas, três e quatro faltas simultâneas em uma rede real de grande porte. Os resultados mostraram que a metodologia, mesmo para sistemas grandes, é capaz de encontrar soluções em tempos de execução compatíveis com as necessidades práticas do problema. Além disso, o uso da NBEL assegurou a obtenção de soluções com os menores valores de ENS por nível de prioridade quando uma restauração completa é possível, inclusive em casos complexos com muitas faltas.

A execução da NBEL juntamente com o AEMO apresentou ainda a vantagem de propor uma diversidade de soluções de acordo com o cenário tratado. Dessa forma, é possível garantir tanto o encontro de soluções de restauração completa, em situações nas quais as restrições operacionais de rede não são violadas, quanto definir diferen-

tes soluções de restauração parcial quando não é possível restabelecer o fornecimento de energia a todos os setores. Tal característica se torna uma vantagem com relação a muitas abordagens presentes na literatura, que só fornecem soluções quando existe a possibilidade de restaurar todas as cargas afetadas. Logo, a ferramenta é capaz de conceder ao operador de um SD diversas opções de reconexão das cargas dependendo do problema a ser resolvido.

## REFERÊNCIAS

- Camillo, M.H., Fanucchi, R.Z., Romero, M.E., de Lima, T.W., da Silva Soares, A., Delbem, A.C.B., Marques, L.T., Maciel, C.D., and Junior, J.B.A.L. (2016). Combining exhaustive search and multi-objective evolutionary algorithm for service restoration in large-scale distribution systems. *EPSR*, 134, 1–8.
- Carvalho, E.O.P.d. (2020). *Restabelecimento de energia em sistemas de distribuição considerando a existência de geração distribuída*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. *IEEE trans. on evolutionary computation*, 6(2), 182–197.
- Delbem, A.C., de Carvalho, A., Policastro, C.A., Pinto, A.K., Honda, K., and Garcia, A.C. (2004). Node-depth encoding for evolutionary algorithms applied to network design. In *GECCO 2004: Genetic and Evolutionary Computation Conference, Seattle, WA, USA, June 26–30, 2004. Proceedings, Part I*, 678–687. Springer.
- Lim, S.I., Lee, S.J., Choi, M.S., Lim, D.J., and Ha, B.N. (2006). Service restoration methodology for multiple fault case in distribution systems. *IEEE Trans. on Power Systems*, 21(4), 1638–1644.
- Linares, P. and Rey, L. (2013). The costs of electricity interruptions in Spain. are we sending the right signals? *Energy Policy*, 61, 751–760.
- Marques, L.T., Delbem, A.C.B., and London, J.B.A. (2017). Service restoration with prioritization of customers and switches and determination of switching sequence. *IEEE Trans. on Smart Grid*, 9(3), 2359–2370.
- Romero, R., Franco, J.F., Leão, F.B., Rider, M.J., and De Souza, E.S. (2015). A new mathematical model for the restoration problem in balanced radial distribution systems. *IEEE Trans. on power systems*, 31(2), 1259–1268.
- Santos, A., Delbem, A.C.B., London, J., and Bretas, N.G. (2010). Node-depth encoding and multiobjective evolutionary algorithm applied to large-scale distribution system reconfiguration. *IEEE Trans. on Power Systems*, 25(3), 1254–1265.
- Santos, A., Nanni, M., Mansour, M., Delbem, A.C.B., London, J., and Bretas, N.G. (2008). A power flow method computationally efficient for large-scale distribution systems. In *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 1–6. IEEE.
- Zidan, A., Khairalla, M., Abdrabou, A.M., Khalifa, T., Shaban, K., Abdrabou, A., El Shatshat, R., and Gabouta, A.M. (2016). Fault detection, isolation, and service restoration in distribution systems: State-of-the-art and future trends. *IEEE Trans. on Smart Grid*, 8(5), 2170–2185.