UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
FACULDADE DE ARQUITETURA, ENGENHARIA E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GUSTAVO DA SILVA PINHEIRO RONDON

VALIDAÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA RESTABELECIMENTO DE ENERGIA EM CENÁRIOS DE MÚLTIPLAS FALTAS EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO REAL DE GRANDE PORTE

CUIABÁ – MT
DEZEMBRO, 2022

GUSTAVO DA SILVA PINHEIRO RONDON

VALIDAÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA RESTABELECIMENTO DE ENERGIA EM CENÁRIOS DE MÚLTIPLAS FALTAS EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO REAL DE GRANDE PORTE

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador:
Prof. Dr. Leandro Tolomeu Marques

CUIABÁ – MT

DEZEMBRO, 2022

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

R771v Rondon, Gustavo da Silva Pinheiro.
Validação de uma metodologia para restabelecimento de energia em cenários de múltiplas faltas em um sistema de distribuição real de grande porte [recurso eletrônico] / Gustavo da Silva Pinheiro Rondon. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 23 f., il. color., pdf). -- 2022.

Orientador: Leandro Tolomeu Marques.
TCC (graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2022.
Modo de acesso: World Wide Web: https://bdm.ufmt.br.
Inclui bibliografia.

1. Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso. I. Marques, Leandro Tolomeu, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

DESPACHO

Processo nº 23108.104254/2022-17

Interessado: GUSTAVO DA SILVA PINHEIRO RONDON

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA MONOGRAFIA: "VALIDAÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA RESTABELECIMENTO DE ENERGIA EM CENÁRIOS DE MÚLTIPLAS FALTAS EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO REAL DE GRANDE PORTE"

ALUNO: **GUSTAVO DA SILVA PINHEIRO RONDON**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 14 de dezembro de 2022.

Nota final: 10 (Dez)

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. **LEANDRO TOLOMEU MARQUES**

Orientador

Eng. Eletricista Especialista **MURILO CASTILHO DA SILVA**

Examinador

Prof. Dr. **FILLIPE VASCONCELO DE MATOS**

Examinador

Documento assinado eletronicamente por **LEANDRO TOLOMEU MARQUES**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 19/12/2022, às 18:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Murilo Castilho da Silva**, **Usuário Externo**, em 20/12/2022, às 23:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **FILLIPE MATOS DE VASCONCELOS**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 21/12/2022, às 17:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5379686** e o código CRC **47336086**.

DEDICATÓRIA

A Deus e à minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as oportunidades e graças a mim concedidas durante toda a minha trajetória, possibilitando meu ingresso, meu desenvolvimento e minha conclusão do curso de engenharia elétrica.

Aos meus pais, Anna Carolina e Danilo, à minha irmã, Giovanna, ao meu tio, Fábio, e aos meus avós, por todo carinho, paciência, apoio, cuidado, amor e inspiração fornecidos a mim em todos os meus passos, o que mantém acesa a vontade de sempre buscar a melhor versão de mim mesmo e me incentiva a não desistir perante as dificuldades da vida.

Ao meu orientador, professor Leandro Tolomeu Marques, pela oportunidade de desenvolver minhas primeiras pesquisas e promover grandes avanços em minha jornada acadêmica, pela paciência, pela fé em meu trabalho e pelos valiosos ensinamentos.

Aos meus colegas e amigos, Vicente, Gabriel Aguiar, Gabriel Caurin, Ellian Victor e João Lucas, que iniciaram o curso ao meu lado e ao meu lado permaneceram até o fim, sempre ajudando e incentivando uns aos outros, proporcionando memórias incríveis, risadas até nos momentos mais obscuros, boas histórias e por configurarem verdadeiros companheiros de vida.

Ao João Pedro, Samila, Lucas, Rachel, Brenda e Matheus, por serem pessoas especiais e amigos maravilhosos que encontrei ao longo do caminho, os quais me concederam apoio e compartilharam comigo aventuras e momentos inesquecíveis.

Aos colegas de pesquisa e demais colegas do curso, pelo companheirismo e apoio.

Aos professores e técnicos do curso de engenharia elétrica da UFMT, por toda instrução, suporte, auxílio, paciência e inspiração ao longo desses anos.

A todos os que depositaram esperanças e confiança em meu trabalho e na minha trajetória.

RESUMO

RONDON, G.S.P. **Validação de uma metodologia para restabelecimento de energia em cenários de múltiplas faltas em um sistema de distribuição real de grande porte**. 2022. 24f. Trabalho Final de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2022.

As onerosas ocorrências de faltas nos sistemas de distribuição demandam planos de restabelecimento que minimizem a energia não suprida aos consumidores e respeitem as restrições operacionais da rede. Nesse contexto, este artigo busca validar computacionalmente, em cenários de múltiplas faltas simultâneas, uma metodologia destinada ao restabelecimento de energia em sistemas de distribuição reais, capaz de considerar a existência de diferentes níveis de prioridade de atendimento entre os consumidores, encontrar soluções de restauração parcial, além de priorizar a operação de chaves controladas remotamente. Ademais, nesse artigo é proposta uma extensão na busca exaustiva aplicada localmente para a obtenção de soluções de restauração completa em casos de faltas que afetem alimentadores vizinhos. A metodologia foi testada em situações de até quatro faltas simultâneas e se mostrou capaz de fornecer soluções para os cenários mais críticos e desafiadores de faltas múltiplas.

Palavras-chave: Algoritmo Evolutivo Multi-objetivo. Busca Exaustiva Local. Múltiplas Faltas. Restabelecimento de energia.

ABSTRACT

RONDON, G.S.P. **Validation of a methodology for service restoration in multiple faults scenarios in a large real distribution system**. 2022. 24f. Trabalho Final de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2022.

The costly occurrences of faults in the distribution systems demand restoration plans that minimize the energy not supplied to consumers and respect the operational constraints of the network. In this context, this article seeks to computationally validate, in scenarios of multiple simultaneous faults, a methodology aimed at restoring energy in real distribution systems, capable of considering the existence of different levels of service priority among consumers, finding partial restoration solutions, in addition to prioritizing the operation of remotely controlled switches. Moreover, this article proposes an extension to the exhaustive search applied locally to obtain complete restoration solutions in cases of faults that affect neighboring feeders. The methodology was tested in situations of up to four simultaneous faults and proved capable of providing solutions for the most critical and challenging scenarios of multiple faults.

Keywords: Local Exhaustive Search. Multi-objective Evolutionary Algorithm. Multiple Faults. Service Restoration.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1 - Representação de um sistema de distribuição a partir de uma floresta de grafos....17
Figura 2 - RNP das árvores de grafo da Fig. 1. 17
Figura 3 - Fluxograma simplificado da metodologia base. 18
Figura 4 - Sistema de distribuição de 53 barras.....19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Percentual de casos que apresentaram ao menos uma solução factível encontrada pela NBELM 20
Tabela 2 - Dados de energia e potência não suprida, por nível de prioridade, para cada caso de faltas múltiplas 20
Tabela 3 - Resultados experimentais do Caso 1 21
Tabela 4 - Resultados experimentais do Caso 2 21
Tabela 5 - Resultados experimentais do Caso 3 22
Tabela 6 - Resultados experimentais do Caso 4 22
Tabela 7 - Resultados experimentais do Caso 5 23
Tabela 8 - Sequência de chaveamento das soluções 1.a e 2.c do Caso 5 23
Tabela 9 - Resultados experimentais do Caso 6 23

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEMO	Algoritmo Evolutivo Multi-objetivo
BEL	Busca Exaustiva Local
BELM	Busca Exaustiva Local Modificada
CAO	*Change Ancestor Operator*
CCM	Chave controlada manualmente
CCR	Chave controlada remotamente
ENS	Energia não suprida
LRO	*Load Reconnector Operator*
NA	Normalmente aberta
NBELM	Nova Busca Exaustiva Local Modificada
NF	Normalmente fechada
NSGA-II	*Non Dominated Sorting Genetic Algorithm II*
PA	Prioridade alta
PAO	*Preserve Ancestor Operator*
PB	Prioridade baixa
PE	Processo evolutivo
PI	Prioridade intermediária
PNS	Potência ativa não suprida
RE	Restabelecimento de energia
RNP	Representação Nó-Profunidade
SD	Sistema de distribuição
SP	Sem prioridade

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	Energia não suprida durante o tempo de operação de uma configuração
ψ	Número de manobras em chaves para obtenção de uma configuração
G	Configuração radial do SD representada por uma floresta de grafos
G^e	Porção de G que se encontra energizada
G^{ne}	Porção de G fora de serviço
$A(G^e)$	Matriz de incidência nó-aresta pseudo-orientada de G^e
$x(G^e)$	Vetor de correntes complexas nas linhas em G^e
$c(G^e)$	Vetor de correntes complexas nas barras de carga e subestações em G^e
$Y_x(G^e)$	Matriz diagonal de admitâncias da rede em G^e
$\mathrm{v}(G^e)$	Vetor de tensões complexas nas barras em G^e
$X(G^e)$	Carregamento máximo de rede em G^e
$\bar{x}_j$	Limite superior para magnitude de corrente em uma linha
x_j	Magnitude de corrente em uma linha
$B(G^e)$	Carregamento máximo de subestação em G^e
$\bar{b}_s$	Limite superior de corrente injetada por uma subestação
b_s	Corrente provida por um transformador em subestação abaixadora
$V(G^e)$	Máxima queda de tensão relativa em G^e
v_s	Magnitude de tensão na barra secundária de um transformador
v_k	Magnitude de tensão em uma barra de um alimentador
δ	Máxima queda de tensão relativa permitida
$seq(G)$	Sequência de manobras de chaveamento para obtenção de G
Ω_N	Conjunto de agrupamentos de setores saudáveis desligados

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO 15
II. ENUNCIADO FORMAL DO PROBLEMA 16
III. METODOLOGIA BASE E MELHORIAS 17
A. Metodologia Base 17
B. Melhoria na metodologia base 18
IV. RESULTADOS 19
A. Caso 1 20
B. Caso 2 21
C. Caso 3 22
D. Caso 4 22
E. Caso 5 23
F. Caso 6 23
V. CONCLUSÕES 24

VALIDAÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA RESTABELECIMENTO DE ENERGIA EM CENÁRIOS DE MÚLTIPLAS FALTAS EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO REAL DE GRANDE PORTE

Gustavo S. P. Rondon
Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT, FAET/Departamento de Engenharia Elétrica, Cuiabá – MT
gugaprime@gmail.com

***Resumo* - As onerosas ocorrências de faltas nos sistemas de distribuição demandam planos de restabelecimento que minimizem a energia não suprida aos consumidores e respeitem as restrições operacionais da rede. Nesse contexto, este artigo busca validar computacionalmente, em cenários de múltiplas faltas simultâneas, uma metodologia destinada ao restabelecimento de energia em sistemas de distribuição reais, capaz de considerar a existência de diferentes níveis de prioridade de atendimento entre os consumidores, encontrar soluções de restauração parcial, além de priorizar a operação de chaves controladas remotamente. Ademais, nesse artigo é proposta uma extensão na busca exaustiva aplicada localmente para a obtenção de soluções de restauração completa em casos de faltas que afetem alimentadores vizinhos. A metodologia foi testada em situações de até quatro faltas simultâneas e se mostrou capaz de fornecer soluções para os cenários mais críticos e desafiadores de faltas múltiplas.**

***Palavras-Chave* – Algoritmo Evolutivo Multi-objetivo, Busca Exaustiva Local, Múltiplas Faltas, Restabelecimento de energia.**

VALIDATION OF A METHODOLOGY FOR SERVICE RESTORATION IN MULTIPLE FAULTS SCENARIOS IN A LARGE REAL DISTRIBUTION SYSTEM

***Abstract* - The costly occurrences of faults in the distribution systems demand restoration plans that minimize the energy not supplied to consumers and respect the operational constraints of the network. In this context, this article seeks to computationally validate, in scenarios of multiple simultaneous faults, a methodology aimed at restoring energy in real distribution systems, capable of considering the existence of different levels of service priority among consumers, finding partial restoration solutions, in addition to prioritizing the operation of remotely controlled switches. Moreover, this article proposes an extension to the exhaustive search applied locally to obtain complete restoration solutions in cases of faults that affect neighboring feeders. The methodology was tested in situations of up to four simultaneous faults and proved capable of providing solutions for the most critical and challenging scenarios of multiple faults.**

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

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas de distribuição (SD) são, normalmente, operados em uma configuração radial devido à maior simplicidade na coordenação dos dispositivos de proteção, maior simplicidade de operação e minimização das correntes de defeito [1]. 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 defeituoso, mesmo que elas não tenham sido afetadas pela falha [1].

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 [2]. Portanto, para a redução dos prejuízos, é realizada uma mudança na topologia do SD usando as chaves normalmente fechadas (NF) e normalmente abertas (NA) disponíveis na rede, com o intuito de transferir os consumidores saudáveis desligados a outros alimentadores [1], sendo esse processo 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 [3].

Dessa forma, muitas metodologias foram propostas na literatura para auxiliarem na determinação de um adequado plano de restabelecimento, o qual 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 [4]. A busca por um plano de restabelecimento ótimo, portanto, consiste em um problema de otimização combinatório [5], que pode ser resolvido seguindo uma abordagem tradicional baseada em programação matemática [6], a qual garante a obtenção de uma solução ótima global do problema. Contudo, a abordagem tradicional demanda a definição de uma única função objetivo, o que compromete a qualidade do plano de restabelecimento.

Nessa perspectiva, muitos métodos alternativos têm sido propostos nessa área, como os algoritmos meta-heurísticos, dentre os quais pode-se citar os algoritmos evolutivos [4]. Em [5] 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 melhor explorar o espaço de busca [5], além de utilizar uma estrutura de dados computacionalmente eficiente intitulada Representação Nó-Profunidade (RNP), na qual os SDs são representados como florestas de grafos [7].

Considerando as vantagens, diversas contribuições posteriores foram feitas ao tratamento do problema de RE utilizando AEMOs e a RNP. Em [8] 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 factível que evita mais de uma operação em uma mesma chave. Em [3], por outro lado, é apresentada uma busca exaustiva local (BEL) como um método capaz de melhorar a qualidade das soluções encontradas pelos AEMOs, encontrando todas as possibilidades de restaurar todos os setores afetados a partir do fechamento de chaves NAs que os conectam a um alimentador energizado.

Em [9], por sua vez, é proposta uma metodologia mais robusta que une a BEL [3] a um novo AEMO em tabelas de subpopulação e utiliza a RNP. Essa metodologia, além de priorizar operações em CCRs e considerar os 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 (uma vez que hospitais, aeroportos e centros de segurança pública, por exemplo, possuem maior prioridade que as demais cargas). Contudo, tal metodologia foi validada apenas para casos de faltas simples em SDs reais.

Em situações reais, múltiplas faltas simultâneas, resultando em duas ou mais regiões fora de serviço, podem ocorrer em função de condições climáticas severas, como tempestades ou inundações, ou em incêndios em subestações capazes de produzirem as mesmas consequências [10]. Apesar de serem raros, esses casos provocam maiores impactos à rede.

Nesse sentido, essa pesquisa busca validar computacionalmente a metodologia base, exposta em [9], em cenários de faltas múltiplas em um SD real de grande porte. Para tanto, foi proposta uma extensão na BEL e os casos mais críticos de duas, três e quatro faltas simultâneas foram então simulados utilizando duas metodologias distintas, com o intuito de avaliar e comparar o desempenho da metodologia base nesses cenários.

Esse artigo está organizado da seguinte maneira: Na seção II é descrito um enunciado formal para o problema de RE em SDs; Na seção III são apresentadas a metodologia base e a melhoria proposta na BEL para sua aplicação em casos de faltas múltiplas; Na seção IV são expostos os resultados obtidos nas simulações realizadas em um SD real; Na seção V são apresentadas as considerações finais e trabalhos futuros.

II. ENUNCIADO FORMAL DO PROBLEMA

Um SD operando na forma radial pode ser representado por meio de uma floresta de grafos, a qual corresponde a um conjunto de grafos acíclicos e conectados [8]. O enunciado formal do problema de RE, a partir de uma representação da rede elétrica por meio de grafos, pode ser representado sucintamente a partir da Formulação 1 [9], a qual considera quatro diferentes níveis de prioridade entre os consumidores, operações em dois tipos de chaves e considera a possibilidade de restauração parcial dos setores saudáveis desligados.

Min. $\varepsilon_A(G)$, e com '$\varepsilon_{A_{min}}(G)$':
Min. $\varepsilon_{A_{min}}(G) + \varepsilon_I(G)$, e com '$\varepsilon_{I_{min}}(G)$':
Min. $\varepsilon_{A_{min}}(G) + \varepsilon_{I_{min}}(G) + \varepsilon_B(G)$, e com '$\varepsilon_{B_{min}}(G)$':
Min. $\varepsilon_{A_{min}}(G) + \varepsilon_{I_{min}}(G) + \varepsilon_{B_{min}}(G) + \varepsilon_S(G)$;
Min. $\psi_M(G)$, e com '$\psi_{M_{min}}(G)$':
Min. $\psi_{M_{min}}(G) + \psi_R(G)$
Sujeito a:

$$\begin{gathered} A(G^e)x(G^e) = c(G^e) \\ A(G^e)Y_x(G^e)A(G^e)^t v(G^e) = c(G^e) \\ X(G^e) \leq 1 \\ B(G^e) \leq 1 \\ V(G^e) \leq \delta \\ G^e \; deve \; ser \; uma \; floresta \; de \; grafos \\ G = G^e \cup G^{ne} \\ seq(G) \; ser \; factível \end{gathered} \tag{1}$$

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 energia não suprida (ENS), durante o intervalo de tempo necessário para a execução das ações de reparo nos setores em falta, 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) 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; $\psi_R(G)$ 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 $X(G^e) = MAX\{x_j/\bar{x}_j\}$, 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 $B(G^e) = MAX\{b_s/\bar{b}_s\}$, 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 $V(G^e) = MAX\{|v_s - v_k|/v_s\}$, 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, δ é a máxima queda de tensão admissível; $seq(G)$ representa a sequência de chaveamento de G, ou seja, a sequência de manobras de chaveamento que deverão ser executadas para a obtenção de G a partir de G^{pf}.

As duas primeiras restrições do problema equivalem, respectivamente, à primeira e segunda leis de Kirchhoff. A terceira, quarta e quinta restrições representam,

respectivamente, os limites para carregamento de rede, carregamento de transformador e queda de tensão. A sexta restrição corresponde à necessidade de manutenção da radialidade da porção energizada da rede, ao passo que a sétima indica que o SD está dividido em duas porções, sendo uma energizada e outra fora de serviço, salientando que as restrições operacionais da rede são aplicadas somente à parte que permanece em serviço. A última restrição, por sua vez, simboliza que a segurança operacional da rede deve ser garantida ao longo da execução das manobras de chaveamento para a obtenção de G a partir de G^{pf}.

Além disso, em [9] a minimização da ENS é tratada como um problema hierárquico, ou seja, primeiro deve-se minimizar a ENS aos consumidores com PA. Encontrado o valor mínimo de $\varepsilon_A(G)$, busca-se então minimizar a ENS aos consumidores com PI e assim sucessivamente, reduzindo a ENS aos consumidores com PB e, por fim, diminuindo a ENS aos consumidores SP.

Essa hierarquia também é estabelecida entre as chaves dos SDs. As CCRs possuem custos e tempos de operação menores que as CCMs, considerando que elas não demandam a mobilização de equipes de campo e podem ser operadas diretamente dos centros de operação dos SDs [8]. Nessa perspectiva, a minimização do número de manobras pode ser representada como a minimização de $\psi_M(G)$. Com o mínimo valor de $\psi_M(G)$, é então minimizado $\psi_R(G)$.

Nesse trabalho é feito o emprego da RNP para representação computacional dos SDs, que consiste em uma representação em árvore de grafo baseado em uma lista dos nós da árvore e suas profundidades [7]. No contexto dos SDs, a profundidade de um setor pode ser entendida como a quantidade de chaves que o distanciam do setor raiz do alimentador ao qual está conectado. Na Figura 1 é exibido um SD representado na forma de um grafo, no qual os nós simbolizam os setores, as linhas contínuas são as chaves NFs e as linhas tracejadas correspondem as chaves NAs. Na Figura 2, por outro lado, são apresentadas as RNPs das árvores de grafo que representam cada alimentador.

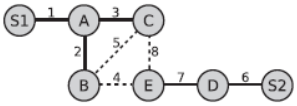

Fig. 1. Representação de um sistema de distribuição a partir de uma floresta de grafos [3].

$$T_1 = \begin{vmatrix} \text{nó} \\ \text{prof.} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \text{S1} & \text{A} & \text{B} & \text{C} \\ 0 & 1 & 2 & 2 \end{vmatrix}$$

$$T_2 = \begin{vmatrix} \text{nó} \\ \text{prof.} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \text{S2} & \text{D} & \text{E} \\ 0 & 1 & 2 \end{vmatrix}$$

Fig. 2. RNP das árvores de grafo da Fig. 1 [3].

A RNP assegura a obtenção de novas florestas de grafo a cada aplicação de seus operadores genéticos, ou seja, todas as configurações geradas são radiais, fazendo com que não seja necessária a execução de um algoritmo para testar essa restrição do problema de RE [5]. Dessa forma, a sexta restrição apresentada na Formulação 1 é sempre respeitada ao se assegurar que G^e é uma floresta de grafo gerada por um dos operadores da RNP [9].

III. METODOLOGIA BASE E MELHORIAS

A. Metodologia Base

A metodologia proposta em [3] corresponde a um método determinístico envolvendo a execução de uma busca exaustiva local destinada à obtenção de todas as possibilidades de restauração completa dos setores afetados, conectando-os a alimentadores energizados utilizando apenas as chaves NAs que se encontram na primeira vizinhança das áreas fora de serviço, as quais são chamadas de chaves NAs do *Tier 1* [11]. Portanto, as soluções obtidas demandam apenas manobras de chaveamento destinadas à isolação dos setores em falta e reconexão dos setores saudáveis desligados.

Em [9], é apresentada uma busca exaustiva local modificada (BELM) para considerar os diferentes níveis de prioridade entre os consumidores. Dessa maneira, todas as chaves NAs do *Tier 1* são ordenadas e operadas seguindo a ordem de prioridade dos consumidores presentes nos agrupamentos que serão restaurados por cada chave. Portanto, são primeiramente restaurados os agrupamentos com consumidores com os maiores níveis de prioridade de atendimento.

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; além de outras informações [9]. Nessa etapa, é empregado um fluxo de carga pelo método de varredura direta/inversa com a RNP [12], 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 [12].

Se a BELM for capaz de encontrar soluções factíveis, ou seja, que respeitem as restrições apresentadas na Formulação 1, é escolhida como solução final aquela que possuir os menores valores de ENS, dentre as soluções factíveis obtidas, considerando-se os níveis de prioridade de atendimento dos consumidores [9]. Caso não seja possível obter soluções factíveis de restauração completa utilizando a BELM, as configurações geradas pela BELM serão utilizadas para compor a população inicial do AEMO proposto em [9], juntamente com o indivíduo G^1, o qual corresponde à configuração da rede na qual apenas são manobradas as chaves necessárias para isolar os setores em falta. Portanto, o AEMO possui a finalidade de tratar casos de restauração parcial ou de restauração completa que exigem manobras para alívio de alimentadores [9].

O AEMO utiliza o conceito de Tabelas de Subpopulação, no qual cada tabela armazena as melhores soluções para um determinado objetivo sem exigir a agregação dos objetivos em uma função utilizando fatores de ponderação [5]. As 10 primeiras tabelas selecionam os indivíduos analisando vários critérios, como os valores de $\psi_M(G)$, $\psi_R(G)$ e ENS seguindo os níveis de prioridade, entre outros, configurando Tabelas Multi-Critérios [9]. As 10 tabelas seguintes empregam a estratégia denominada Seleção por Não-Dominância, presente no *Non Dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II), proposto em [13], com o intuito de melhorar a diversidade das soluções na região central das fronteiras de Pareto [9]. As 6

últimas tabelas, por sua vez, são fundamentadas no conceito tradicional de tabelas de subpopulação, avaliando apenas um critério em cada tabela [5].

A obtenção de um novo indivíduo é realizada a partir de uma seleção randômica de uma das tabelas de subpopulação. Dentro dessa tabela, é escolhido 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}) [7], 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 [7] são propostos os operadores *Preserve Ancestor Operator* (PAO) e o *Change Ancestor Operator* (CAO), sendo que o PAO mantém a raiz da subárvore podada que está sendo transferida, ao passo que o CAO modifica a raiz dessa subárvore, podendo produzir alterações mais complexas [5].

O AEMO utilizado nessa metodologia, contudo, emprega também um novo operador, denominado *Load Reconnector Operator* (LRO), o qual, diferentemente do PAO e do CAO, realiza a geração de um novo indivíduo a partir da reconexão de setores saudáveis desligados que se encontram fora de serviço [9]. Esse operador é baseado nos operadores PAO e CAO da RNP, contudo, utilizado para transferir setores que se encontram na porção não-energizada G^{ne} da configuração G para a porção energizada G^{e}. Por meio do LRO, é possível restaurar apenas uma parcela dos setores fora de serviço, seguindo o nível de prioridade dos consumidores, permitindo, portanto, a obtenção de soluções que restauram cargas mais prioritárias.

No método proposto em [9], o operador LRO possui uma maior prioridade na obtenção de um novo indivíduo, ou seja, caso a solução selecionada nas tabelas possua consumidores desligados, o operador LRO será aplicado com o intuito de restabelecer a energia a esses setores ou ao menos a uma parte deles. O novo indivíduo obtido é então avaliado e, caso sejam desrespeitados os limites operacionais, ele é descartado e aplicado o PAO ou o CAO no indivíduo selecionado, para a realização de manobras de alívio de alimentador.

Após a definição e avaliação de um novo indivíduo, é então verificada se, para a obtenção dessa configuração, alguma chave retornou ao seu estado inicial. Caso isso ocorra, com o intuito de se obter sequências de chaveamento sem chaves repetidas, é executado o algoritmo proposto em [8] para correção da sequência de chaveamento. A eliminação de manobras em uma mesma chave acarreta uma nova sequência de chaveamento que produz novas configurações intermediárias, as quais também são avaliadas e concorrem entre si para preencher as tabelas de subpopulação [9]. Para que um indivíduo-filho faça parte de uma tabela, o número de soluções armazenadas nessa tabela deve ser inferior ao número máximo estipulado nos parâmetros de entrada do algoritmo, ou o indivíduo-filho deve ser melhor que a pior solução armazenada na tabela, de acordo com o critério avaliado pela tabela em questão.

Ao se atingir o número máximo de gerações, o processo evolutivo (PE) é então encerrado. No entanto, considerando a divisão da população em tabelas, 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 [4]. 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.

Portanto, os indivíduos factíveis armazenados nas tabelas são separados por grau de dominância, seguindo a estratégia de seleção por não-dominância [13]. Para a seleção das soluções não dominadas, foram analisados os valores de energia total não suprida ($\varepsilon_T(G)$) e do total de manobras em chaves ($\psi_T(G)$) [9].

A escolha das soluções finais a partir de um conjunto Pareto-ótimo, no entanto, é uma tarefa difícil que depende da filosofia de cada concessionária de distribuição [9], portanto, um estudo a respeito das melhores soluções a serem exibidas não é alvo desse trabalho. Logo, após a determinação do conjunto Pareto-ótimo, são selecionadas até três soluções finais, sendo aquela com o menor valor de $\varepsilon_T(G)$, a solução com o menor valor de $\psi_T(G)$ e outra que melhor pondera os valores de $\varepsilon_T(G)$ e $\psi_T(G)$. Com isso, a metodologia base pode ser resumida no fluxograma simplificado apresentado na Figura 3.

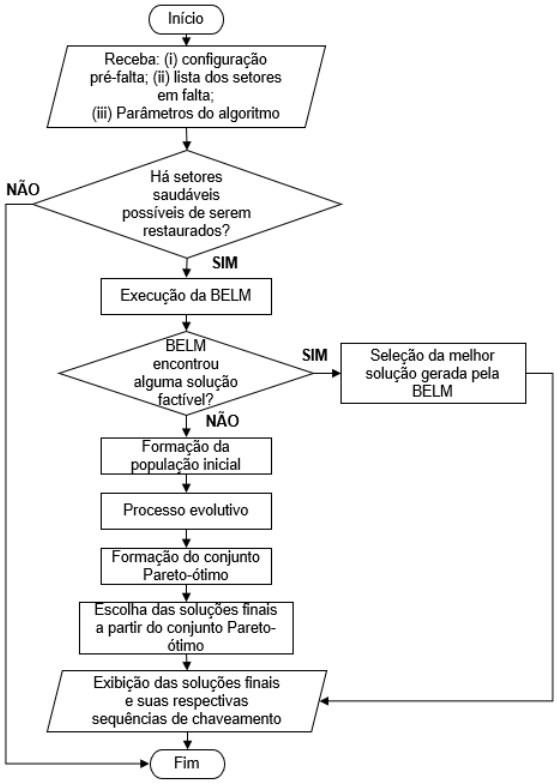

Fig. 3. Fluxograma simplificado da metodologia base.

B. Melhoria na metodologia base

Ao se considerar casos de múltiplas faltas simultâneas nos SDs, alguns ajustes, no entanto, precisam ser realizados na metodologia base para torná-la mais robusta e capaz de lidar com essas situações mais complexas. Isso ocorre pois, durante a execução da BELM, a busca por apenas chaves NAs do *Tier 1* que conectam os setores fora de serviço a alimentadores energizados não garante o restabelecimento de energia a todos os consumidores saudáveis, especialmente na ocorrência de falhas que afetem dois ou mais alimentadores vizinhos. Para ilustrar essa situação, será utilizado como exemplo o sistema

de 53 barras apresentado na Figura 4 [4]. 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 números pretos representam os setores (os números em negrito identificam a origem de cada um dos alimentadores que partem das subestações).

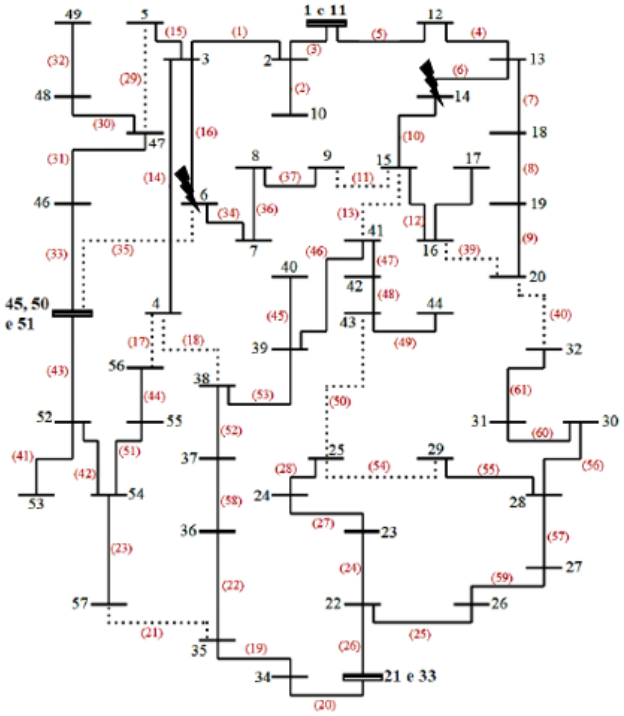

Fig. 4. Sistema de distribuição de 53 barras [4].

Uma ocorrência de faltas nos setores 6 e 14 produziria dois agrupamentos de setores saudáveis desligados, sendo o primeiro constituído pelos setores 7, 8 e 9, enquanto o segundo corresponde aos setores 15, 16 e 17. Nessa situação, nota-se que, após a ocorrência das falhas, não há um alimentador energizado imediatamente disponível para a restauração do primeiro agrupamento de setores não-energizados, uma vez que a única chave NA disponível é a chave 11, entre os setores 9 e 15, contudo, o setor 15 se encontra desligado. Entretanto, apesar da inexistência de um alimentador energizado vizinho, isso não implica que não há solução que restabeleça todos os consumidores. Caso o segundo agrupamento seja restaurado pelo fechamento da chave 13, entre os setores 15 e 41, ou pela chave 39, entre os setores 16 e 20, o restabelecimento do fornecimento de energia a esses consumidores permitirá que então seja restaurado o primeiro agrupamento pelo fechamento da já mencionada chave 11. Dessa forma, a ordem de operação das chaves desempenha um papel fundamental na determinação de soluções de restauração completa.

Nessa perspectiva, esse trabalho propõe uma nova busca exaustiva local modificada (NBELM). 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 Ω_N, sendo $N = 1, 2,..., n$. Os agrupamentos pertencentes ao conjunto Ω_1 são aqueles que possuem chaves NAs do *Tier 1* que os conectam diretamente a alimentadores energizados. Os agrupamentos do conjunto Ω_2 são aqueles que não pertencem ao conjunto Ω_1, contudo, possuem chaves NAs do *Tier 1* que os conectam aos setores desligados de Ω_1. Ou seja, Ω_2 corresponde aos agrupamentos de setores saudáveis desligados que só podem ser restaurados se os agrupamentos pertencentes a Ω_1 forem inicialmente energizados. Essa lógica se estende até o *n-ésimo* conjunto, constituído de agrupamentos não pertencentes a Ω_{n-1}, mas que possuem chaves NAs do *Tier 1* que os conectam aos agrupamentos de Ω_{n-1}, sendo que o número de conjuntos formados depende a complexidade do problema tratado. Os agrupamentos de setores desligados que pertencerem a nenhum dos conjuntos formados não possuem possibilidade de restauração, o que pode ocorrer, por exemplo, em cenários nos quais setores vizinhos são desligados por conta das falhas e só podem ser ligados entre si. Com isso, a NBELM pode ser estruturada nos seguintes passos.

Passo 1: Isole os setores em falta por meio da abertura das chaves NFs localizadas imediatamente à jusante e a montante de cada um desses setores.

Passo 2: Faça uma varredura das chaves NAs do *Tier 1* disponíveis na vizinhança dos setores saudáveis desligados e separe os agrupamentos de setores não-energizados em conjuntos Ω_N, sendo $N = 1, 2,..., n$.

Passo 3: Dentro de cada conjunto Ω_N, sendo $N = 1, 2,..., n$, ordene os agrupamentos de acordo com o nível de prioridade de seus consumidores.

Passo 4: Faça uma listagem, para cada agrupamento do conjunto Ω_1, de todas as chaves NAs do *Tier 1* que os conectam a alimentadores energizados.

Passo 5: Faça uma listagem, para cada agrupamento do conjunto Ω_i, sendo $i = 2, 3,..., n$, de todas as chaves NAs do *Tier 1* que os conectam aos agrupamentos do conjunto Ω_{i-1}.

Passo 6: Identifique 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 Ω_1, seguindo a ordem de prioridade dos seus respectivos consumidores, seguidos da restauração dos agrupamentos de Ω_2 e assim sucessivamente.

Passo 7: Aplique cada combinação ordenada de chaves e considere um novo indivíduo a configuração resultante.

Desse modo, primeiro são restaurados os setores que possuem um alimentador energizado em sua vizinhança, abrindo a possibilidade de restauração daqueles que, no momento da ocorrência da falha, não possuíam setores energizados próximos.

IV. RESULTADOS

Com o intuito de analisar o comportamento e a capacidade do AEMO em encontrar soluções à medida em que se incrementa a quantidade falhas simultâneas, além de avaliar o efeito que a NBELM produz aos resultados obtidos pela metodologia base, foram executadas simulações em duas metodologias distintas. A metodologia 1 consiste na metodologia base empregando-se a NBELM em conjunto com o AEMO, ou seja, caso as soluções encontradas pela NBELM não sejam factíveis, elas irão compor a população inicial do PE. Na metodologia 2, por outro lado, será avaliado apenas o AEMO descrito em [9] sem a NBELM, ou seja, a população inicial do PE será constituída pelo indivíduo G^1 e por apenas

uma solução de restauração completa usando chaves NAs do *Tier 1*, gerada aleatoriamente. 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 para validação dessas metodologias foram realizados no SD da cidade de Londrina-PR em operação no ano de 2014. Essa rede contém 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, conforme proposto em [9], foram selecionados aleatoriamente 50% desses consumidores para terem PB, 30% para possuírem PI e 20% para terem PA.

Inicialmente, foram simulados, utilizando a metodologia 1, casos de faltas simples em todos os setores da rede. Em seguida, foram selecionados os 20 setores que, em cenários de faltas simples, acarretaram os maiores valores de ε_T no indivíduo G^1. Na sequência, foram 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 I é exibido o percentual de casos que apresentaram ao menos uma solução factível após a execução da NBELM. O percentual é calculado com base na quantidade de combinações geradas para cada quantidade de faltas.

TABELA I
Percentual de casos que apresentaram ao menos uma solução factível encontrada pela NBELM

N° 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 6 cenários para serem solucionados pelas metodologias 1 e 2, com a finalidade de avaliar e comparar essas metodologias. Os casos selecionados são detalhados a seguir.

Caso 1: Cenário de duas faltas aplicadas aos setores 2164 (alimentador 50) e 2279 (alimentador 53), que corresponde ao caso mais crítico dentre os cenários de duas faltas solucionados pela NBELM.

Caso 2: Cenário de duas faltas aplicadas aos setores 2163 (alimentador 50) e 2244 (alimentador 52), que corresponde ao caso mais crítico dentre os cenários de duas faltas não solucionados pela NBELM.

Caso 3: Cenário de três faltas aplicadas aos setores 2164 (alimentador 50), 2279 (alimentador 53) e 2361 (alimentador 55), que corresponde ao caso mais crítico dentre os cenários de três faltas solucionados pela NBELM.

Caso 4: Cenário de três faltas aplicadas aos setores 816 (alimentador 21), 2163 (alimentador 50) e 2244 (alimentador 52), que corresponde ao caso mais crítico dentre os cenários de três faltas não solucionados pela NBELM.

Caso 5: Cenário de quatro faltas aplicadas aos setores 1419 (alimentador 39), 2164 (alimentador 50), 2279 (alimentador 53) e 2361 (alimentador 55), que corresponde ao caso mais crítico dentre os cenários de quatro faltas solucionados pela NBELM.

Caso 6: Cenário de quatro faltas aplicadas aos setores 816 (alimentador 21), 2163 (alimentador 50), 2244 (alimentador 52) e 2279 (alimentador 53), que corresponde ao caso mais crítico dentre os cenários de quatro faltas não solucionados pela NBELM.

Os setores mencionados estão próximos das subestações, de tal forma que a ocorrência de falhas em cada um deles desliga quase todo o alimentador ao qual estão conectados, deixando uma grande quantidade de consumidores fora de serviço. Na Tabela II são fornecidos os valores do 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 não são executadas manobras para restauração dos setores saudáveis desligados, portanto, todos consumidores permanecem sem fornecimento durante a reparação dos setores faltosos. São também apresentados os dados de ENS por nível de prioridade e de ε_T para a configuração G^1 de cada um dos casos, considerando um tempo de reparação das falhas de 4 horas/Falta.

TABELA II
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	Caso 6
ε_A*	0	341	437	512	1082	682
ε_I*	575	1394	1383	3206	1844	4274
ε_B*	528	229	793	343	1070	1514
ε_S*	102812	111602	227452	241139	399172	420264
ε_T*	103916	113565	230064	245199	403168	426734
PNS_A **	0	43	36	43	68	43
PNS_I **	72	174	115	267	115	267
PNS_B **	66	29	66	29	67	95
PNS_S **	12852	13950	18954	20095	24948	26266
PNS_T **	12990	14196	19172	20433	25198	26671

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

Para todos os 6 casos, foram executadas 30 simulações empregando-se a metodologia 1 e 30 simulações utilizando a metodologia 2. Em todos os cenários, considerou-se um número máximo de 20.000 gerações para serem executadas pelo PE e os valores limites de 10%, 100% e 100% para δ, $X(G^e)$ e $B(G^e)$, respectivamente.

A. Caso 1

Os resultados experimentais obtidos nas simulações do caso 1 estão presentes na Tabela III, a qual exibe as soluções

finais que foram apresentadas pelo algoritmo na maioria dos testes realizados. Na primeira linha da Tabela III está indicado qual foi a metodologia utilizada para se obter cada solução, na segunda linha está indicada a identificação da solução, na terceira é apresentada a origem da solução, ou seja, se ela foi obtida a partir da NBELM ou da execução do PE, ao passo que na quarta linha é indicado a quantidade de vezes que a solução foi obtida dentre as 30 simulações. Os valores de $\varepsilon_A(G)$, $\varepsilon_I(G)$, $\varepsilon_B(G)$, $\varepsilon_S(G)$, $\varepsilon_T(G)$, $PNS_A(G)$, $PNS_I(G)$, $PNS_B(G)$, $PNS_S(G)$ e $PNS_T(G)$ estão apresentados em valores percentuais dos valores das respectivas grandezas obtidas no indivíduo G^1, apresentados na Tabela II. Na última linha é exibido o tempo médio de execução do algoritmo para cada metodologia

TABELA III
Resultados experimentais do Caso 1

	Metodologia 1	Metodologia 2	
Indivíduo	1.a	2.a	2.b
Origem	NBELM	PE	PE
Ocorrência	30 de 30	27 de 30	27 de 30
ε_A[%]*	0	0	0
ε_I[%]*	16	16	16
ε_B[%]*	21	100	21
ε_S[%]*	18	56	18
ε_T[%]*	18	56	18
ψ_M	4	3	4
ψ_R	2	2	2
ψ_T	6	5	6
PNS_A[%]*	0	0	0
PNS_I[%]*	0	0	0
PNS_B[%]*	0	100	0
PNS_S[%]*	0	48	0
PNS_T[%]*	0	48	0
X[%]	99,84	97,36	99,84
V[%]	4,55	4,55	4,55
B[%]	75,17	75,17	75,17
Tempo médio [s]	0,04	19,16	

*% do respectivo valor em G^1, apresentado na Tabela II.

Nota-se que, na metodologia 1, como a NBELM foi capaz de encontrar soluções de restauração completa, em todas as execuções foram apresentadas apenas uma solução final, a qual corresponde à solução obtida pela NBLEM que 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, sendo que, 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 NBELM, além de apresentar uma opção alternativa de restauração parcial que demanda uma manobra a menos em uma CCM.

A NBELM apresentou a vantagem de garantir a obtenção da melhor solução de restauração em um tempo de execução consideravelmente inferior, contudo, a metodologia 1 possui a limitação de exibir uma única solução de restauração completa caso ela seja encontrada pela NBELM, reduzindo, dessa maneira, a diversidade das soluções finais obtidas. Além disso, verifica-se que as soluções de restauração completa possuem valores de $X(G)$ bem próximos ao limite permitido.

B. Caso 2

Os resultados experimentais do caso 2 encontram-se na Tabela IV, a qual exibe as três soluções do conjunto Pareto-ótimo apresentadas como soluções finais na maioria das execuções.

TABELA IV
Resultados experimentais do Caso 2

	Metodologia 1			Metodologia 2		
Indivíduo	1.a	1.b	1.c	2.a	2.b	2.c
Origem	PE	PE	PE	PE	PE	PE
Ocorrência	27 de 30	26 de 30	25 de 30	28 de 30	28 de 30	27 de 30
ε_A[%]*	100	27	27	100	27	27
ε_I[%]*	65	22	22	65	22	22
ε_B[%]*	100	27	27	100	27	27
ε_S[%]*	60	35	25	60	35	25
ε_T[%]*	60	35	25	60	35	25
ψ_M	3	5	6	3	5	6
ψ_R	3	3	3	3	3	3
ψ_T	6	8	9	6	8	9
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
PNS_T[%]*	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
Tempo médio [s]	16,60			18,37		

*% do respectivo valor em G^1, apresentado na Tabela II.

Considerando que, no caso 3, a NBELM não localizou soluções de restauração completa, todas as soluções obtidas pela metodologia 1 são de restauração parcial e foram encontradas a partir da execução do PE. A solução 1.a possui o menor número total de manobras, contudo, houve redução nenhuma nos valores de ε_A e ε_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_T é de 4% do valor de PNS_T do indivíduo G^1, indicando uma redução de 96% no valor de potência não suprida, ou seja, apenas algumas poucas cargas menos prioritárias foram mantidas desligadas. A solução 1.b, por outro lado, apresenta valores de ε_T e ψ_T intermediários entre as soluções 1.a e 1.c.

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 IV, verifica-se que não houveram diferenças significativas entre as duas metodologias no cenário observado.

C. Caso 3

Os resultados experimentais do caso 3 estão expressos na Tabela V, na qual são exibidas as três soluções finais mais recorrentes nas simulações utilizando a metodologia 2, além da melhor configuração de restauração completa encontrada pela NBELM na metodologia 1.

TABELA V
Resultados experimentais do Caso 3

	Metodologia 1	Metodologia 2		
Indivíduo	1.a	2.a	2.b	2.c
Origem	NBELM	PE	PE	PE
Ocorrência	30 de 30	25 de 30	25 de 30	25 de 30
ε_A[%]*	14	100	14	14
ε_I[%]*	14	46	14	14
ε_B[%]*	18	100	100	18
ε_S[%]*	15	70	42	15
ε_T[%]*	15	70	42	15
ψ_M	5	4	4	5
ψ_R	4	3	4	4
ψ_T	9	7	8	9
PNS_A[%]*	0	100	0	0
PNS_I[%]*	0	38	0	0
PNS_B[%]*	0	100	100	0
PNS_S[%]*	0	65	33	0
PNS_T[%]*	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 [s]	0,56	21,06		

*% do respectivo valor em G^1, apresentado na Tabela II.

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 NBELM, 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. Na metodologia 2, foram também apresentadas outras duas soluções de restauração parcial, sendo que a solução 2.b exige uma manobra a menos em uma CCM, em comparação com 2.c, mas mantém desligados todos os consumidores de PB, ao passo que a solução 2.a demanda apenas 7 manobras de chaveamento, contudo, deixa todos os consumidores de PA e PB sem fornecimento.

D. Caso 4

Na Tabela VI são exibidos os resultados experimentais do caso 4. Tanto para a metodologia 1 quanto para a metodologia 2, são apresentadas as três soluções finais mais recorrentes, além de exemplos de soluções encontradas em poucas simulações, mas que possuem qualidade superior àquelas encontras mais frequentemente.

TABELA VI
Resultados experimentais do Caso 4

	Metodologia 1				Metodologia 2			
Indivíduo	1.a	1.b	1.c	1.d	2.a	2.b	2.c	2.d
Origem	PE	PE	PE	PE	PE	PE	PE	PE
Ocorrên-cia	18 de 30	7 de 30	7 de 30	1 de 30	23 de 30	6 de 30	9 de 30	4 de 30
ε_A[%]*	21	32	35	25	21	32	35	21
ε_I[%]*	70	44	29	26	70	44	29	26
ε_B[%]*	21	32	35	25	21	32	35	21
ε_S[%]*	81	48	31	29	81	48	31	30
ε_T[%]*	81	48	31	29	81	48	31	30
ψ_M	6	9	11	11	6	9	11	11
ψ_R	2	3	3	3	2	3	3	3
ψ_T	8	12	14	14	8	12	14	14
PNS_A[%]*	0	0	0	0	0	0	0	0
PNS_I[%]*	62	23	0	0	62	23	0	0
PNS_B[%]*	0	0	0	0	0	0	0	0
PNS_S[%]*	76	29	3	3	76	29	3	3
PNS_T[%]*	76	29	3	3	76	29	3	3
X[%]	85,97	97,36	97,36	97,36	85,97	97,36	97,36	97,36
V[%]	2,13	4,55	4,55	4,55	2,13	4,55	4,55	4,55
B[%]	65,86	75,17	75,17	78,37	65,86	75,17	75,17	78,37
Tempo médio [s]	19,13				19,94			

*% do respectivo valor em G^1, apresentado na Tabela II.

Comparando as soluções 1.a, 1.b e 1.c com as soluções 2.a, 2.b e 2.c, respectivamente, as quais correspondem às soluções mais recorrentes de cada metodologia, nota-se que são exatamente iguais, contudo, a ocorrência dessas soluções é muito baixa. Para esse cenário de três faltas não solucionado pela NBELM, o AEMO possuiu uma enorme dificuldade para convergir em ótimas soluções. Ao longo das simulações foi apresentada uma grande variedade de soluções finais, sendo a maioria dessas soluções dominadas pelas soluções mais recorrentes apresentadas na Tabela VI, ou seja, possuíam maiores valores tanto de ε_T quanto de ψ_T.

Em poucas execuções ainda foram obtidas soluções melhores dos que as de maiores ocorrências. Como exemplo, é possível observar a solução 1.d, encontrada pela metodologia 1 em apenas uma das 30 simulações. A solução 1.d possui o mesmo valor de ψ_T da solução 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. A solução 2.d, obtida pela metodologia 2 em apenas quatro das 30 simulações, também possuiu uma qualidade superior à solução 2.c. Logo, a capacidade do AEMO em encontrar as melhores soluções decaiu consideravelmente, exigindo, possivelmente um aumento na quantidade máxima de gerações a serem executadas no PE.

E. Caso 5

Os resultados experimentais do caso 5 estão expressos na Tabela VII. Apenas duas soluções finais foram encontradas na maioria das simulações utilizando a metodologia 2, sendo ambas de restauração parcial. A solução 2.c corresponde à única solução de restauração completa encontrado pelo AEMO, a qual foi obtida em apenas uma das 30 execuções, realçando a complexidade dos casos de quatro faltas simultâneas e o impacto produzido na eficiência do algoritmo.

TABELA VII
Resultados experimentais do Caso 5

	Metodologia 1	Metodologia 2		
Indivíduo	1.a	2.a	2.b	2.c
Origem	NBELM	PE	PE	PE
Ocorrência	30 de 30	20 de 30	25 de 30	1 de 30
ε_A[%]*	13	53	53	15
ε_I[%]*	13	67	13	13
ε_B[%]*	16	100	17	16
ε_S[%]*	14	79	35	15
ε_T[%]*	14	79	35	15
ψ_M	6	5	6	6
ψ_R	6	4	5	6
ψ_T	12	9	11	12
PNS_A[%]*	0	46	46	0
PNS_I[%]*	0	62	0	0
PNS_B[%]*	0	100	1	0
PNS_S[%]*	0	76	24	0
PNS_T[%]*	0	75	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 [s]	7,99	24,11		

*% do respectivo valor em G^1, apresentado na Tabela II.

Além da dificuldade em localizar uma solução factível de restauração completa, a solução 2.c encontrada pelo AEMO da metodologia 2 é pior que a melhor solução de restauração completa obtida pela NBELM, a qual corresponde à solução 1.a. Nota-se que os valores de ε_A, ε_S e ε_T de 1.a são inferiores aos valores de ε_A, ε_S e ε_T da solução 2.c, sendo que 1.a e 2.c possuem o mesmo número de manobras, evidenciando a importância de uma sequência de chaveamento apropriada.

Na Tabela VIII é apresentada a sequência de chaveamento tanto da solução 1.a quanto da solução 2.c, indicando a identificação das chaves que devem ser operadas. As 8 primeiras operações em ambas soluções são realizadas em chaves NFs com a finalidade de isolar os setores faltosos. As quatro operações seguintes são em chaves NAs do *Tier 1* para reconexão dos setores saudáveis fora de serviço. A operação na chave 1643, por sua vez, restaura o fornecimento a um agrupamento contendo 76 setores desligados (sendo o segundo agrupamento com maior quantidade de cargas prioritárias desligadas). Entretanto, na solução 2.c, a operação nessa chave só é realizada após o fechamento das chaves 1404 e 3503 que restauram agrupamentos de 47 e 23 setores saudáveis desligados, respectivamente.

TABELA VIII
Sequência de chaveamento das soluções 1.a e 2.c do Caso 5

Indivíduo 1.a		Indivíduo 2.c	
ABRIR	FECHAR	ABRIR	FECHAR
1131	-	1131	-
943	-	943	-
2730	-	2730	-
3149	-	3149	-
1156	-	1156	-
1509	-	1509	-
2106	-	2106	-
3139	-	3139	-
-	3494	-	3494
-	1643	-	1404
-	1404	-	3503
-	3497	-	1643

F. Caso 6

Os resultados experimentais do caso 6, por sua vez, são apresentados na Tabela IX.

TABELA IX
Resultados experimentais do Caso 6

	Metodologia 1				Metodologia 2			
Indivíduo	1.a	1.b	1.c	1.d	2.a	2.b	2.c	2.d
Origem	PE	PE	PE	PE	PE	PE	PE	PE
Ocorrência	28 de 30	14 de 30	5 de 30	1 de 30	30 de 30	11 de 30	6 de 30	2 de 30
ε_A[%]*	18	18	18	18	18	18	18	18
ε_I[%]*	69	24	24	23	69	24	24	23
ε_B[%]*	75	75	29	29	75	75	29	29
ε_S[%]*	85	49	30	29	85	49	30	29
ε_T[%]*	85	49	30	29	85	49	30	29
ψ_M	7	11	15	15	7	11	15	15
ψ_R	3	4	4	4	3	4	4	4
ψ_T	10	15	19	19	10	15	19	19
PNS_A[%]*	0	0	0	0	0	0	0	0
PNS_I[%]*	62	0	0	0	62	0	0	0
PNS_B[%]*	70	70	0	0	70	70	0	0
PNS_S[%]*	82	33	2	2	82	33	2	2
PNS_T[%]*	82	33	2	2	82	33	2	2
X[%]	85,97	97,36	97,36	97,36	85,97	97,36	97,36	97,36
V[%]	2,29	4,55	4,55	4,55	2,29	4,55	4,55	4,55
B[%]	49,58	75,17	77,43	77,43	49,58	75,17	77,43	77,43
Tempo médio [s]	24,84				20,14			

*% do respectivo valor em G^1, apresentado na Tabela II.

Nessas simulações também foi constatada uma maior diversidade de soluções finais apresentadas pelo AEMO nas

duas metodologias, indicando dificuldades de convergência. Grande parte das soluções encontradas possuíram qualidade inferior às soluções mais recorrentes apresentadas na Tabela IX, ao passo que algumas poucas soluções demonstraram uma qualidade superior. Por exemplo, é possível comparar a solução 1.d com a 1.c, verificando-se que 1.d possui o mesmo valor de ψ_T apresentado por 1.c, e um valor inferior de ε_T. Entretanto, 1.d foi encontrada em apenas uma execução. Uma comparação análoga pode ser realizada entre as soluções 2.d e 2.c obtidas com a metodologia 2.

V. CONCLUSÕES

Nesse artigo foi validada uma metodologia destinada ao problema de RE envolvendo o processo de reconfiguração de rede, em situações de múltiplas faltas simultâneas em uma rede real de grande porte, considerando aspectos práticos do problema, como a priorização do restabelecimento a cargas prioritárias e operação em CCRs. Ademais, foi proposta uma alteração na BELM, a qual, além de considerar os diferentes níveis de prioridade entre consumidores, prioriza o atendimento a cargas que possuam alimentadores energizados em sua vizinhança, permitindo uma ampliação nas possibilidades de restauração em casos de faltas em alimentadores vizinhos.

Diferentes testes foram realizados nos casos mais críticos de duas, três e quatro faltas simultâneas. Em todas as simulações, tanto a NBELM quanto o AEMO encontraram soluções em tempos de execução compatíveis com as necessidades práticas do problema. Contudo, situações de três e quatro faltas demonstraram ser os cenários mais desafiadores, afetando a eficiência do AEMO.

Além do mais, foi observado que, em um AEMO capaz de avaliar a possibilidade de restaurar parcialmente as cargas saudáveis fora de serviço, a execução prévia da NBELM para compor a população inicial do AEMO não produziu alterações significativas na qualidade das soluções encontradas, em situações nas quais não é possível obter uma solução factível de restauração completa. No entanto, a utilização da NBELM ainda é vantajosa em função do seu baixo tempo de execução e da garantia de obtenção da melhor solução de restauração completa, quando não houver violação dos limites operacionais da rede.

A metodologia base, no entanto, apresentou a limitação de expor apenas uma solução factível de restauração completa quando tal solução é encontrada pela NBELM. A execução do AEMO em conjunto com a NBELM, mesmo quando uma restauração completa é possível, apresentou a vantagem de obter uma diversidade de soluções, cabendo ao operador do SD decidir qual é a melhor solução para ser implementada.

Trabalhos futuros poderão abordar o RE a partir da transferência de cargas a ilhamentos intencionais em situações de contingências na presença de geração distribuída. Para tanto, serão considerados os fenômenos transitórios a fim de evitar que variações de frequência dos geradores desrespeitem os limites permitidos pelos dispositivos de proteção.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a FAPEMAT/UFMT pelo financiamento desse projeto (Termo de Cooperação Técnica n° 0298/2021).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] A. Zidan et al., "Fault Detection, Isolation, and Service Restoration in Distribution Systems: State-of-the-Art and Future Trends," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 5, p. 2170-2185, 2017.

[2] P. Linares, L. Rey R, “The costs of electricity interruptions in spain. are we sending the right signals”. *Energy Policy*, v. 61, p. 751–760, 2013.

[3] M. H. M. Camillo, et al., “Combining exhaustive search and multi-objective evolutionary algorithm for service restoration in large-scale distribution systems”. *Electric Power Systems Research*, v. 134, p. 1-8, 2016.

[4] CARVALHO, E. O. P. Restabelecimento de Energia em Sistemas de Distribuição Considerando a Existência de Geração Distribuída. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2020.

[5] A. C. Santos, et al., "Node-Depth Encoding and Multiobjective Evolutionary Algorithm Applied to Large-Scale Distribution System Reconfiguration," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 3, p. 1254-1265, 2010.

[6] R. Romero, et al., "A New Mathematical Model for the Restoration Problem in Balanced Radial Distribution Systems," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 2, p. 1259-1268, 2016.

[7] A. C. B. Delbem, et al., “Node-depth encoding for evolutionary algorithms applied to network design”. In: *GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION CONFERENCE*. [S.l.], p. 678–687, 2004.

[8] L. T. Marques, A. C. B. Delbem and J. B. A. London, "Service Restoration With Prioritization of Customers and Switches and Determination of Switching Sequence," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, p. 2359-2370, 2018.

[9] MARQUES, L. T. Restabelecimento de energia em sistemas de distribuição considerando aspectos práticos. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo (USP). São Carlos, 2018.

[10] S. . -I. Lim, et al., "Service Restoration Methodology for Multiple Fault Case in Distribution Systems," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 4, p. 1638-1644, 2006.

[11] K. N. Miu, Hsiao-Dong Chiang and R. J. McNulty, "Multi-tier service restoration through network reconfiguration and capacitor control for large-scale radial distribution networks," *Proceedings of the 21st International Conference on Power Industry Computer Applications. Connecting Utilities. PICA 99. To the Millennium and Beyond*, pp. 153-159, 1999.

[12] A. C. Santos, et al., "A power flow method computationally efficient for large-scale distribution systems," *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, pp. 1-6, 2008.

[13] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," in *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, p. 182-197, 2002.