



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Câmpus de Ilha Solteira - SP

MARCO AURÉLIO FERREIRA

**SEQUENCIAMENTO DE OPERAÇÕES DE
CHAVEAMENTO PARA RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS
DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA USANDO
BUSCA TABU E BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL**

Ilha Solteira

2024



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Câmpus de Ilha Solteira - SP

MARCO AURÉLIO FERREIRA

**SEQUENCIAMENTO DE OPERAÇÕES DE
CHAVEAMENTO PARA RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS
DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA USANDO
BUSCA TABU E BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL**

Dissertação de mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia do Câmpus
de Ilha Solteira – UNESP como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica.

Especialidade: Automação.

**Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo
Possagnolo**
Orientador

Ilha Solteira

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

F383s Ferreira, Marco Aurélio.
Sequenciamento de operações de chaveamento para restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica usando busca tabu e busca em vizinhança variável / Marco Aurélio Ferreira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
57 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2024

Orientador: Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo

Inclui bibliografia

1. Busca tabu. 2. Busca em vizinhança variável básica. 3. Restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica. 4. Sequenciamento ótimo de tarefas.


Amanda Sertori dos Santos

Bibliotecária - CRB/8-9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A estratégia meta-heurística poderá oferecer às empresas de distribuição de energia elétrica uma economia de custos, tornando o sistema de distribuição mais eficiente. A população se beneficia da economia, pois haverá um aumento na disponibilidade de energia. Deste modo, será viável aplicar mais recursos em iniciativas sociais.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The metaheuristic strategy could offer electricity distribution companies cost savings, making the distribution system more efficient. The population benefits from the economy, as there will be an increase in energy availability. This will make it possible to invest more resources in social initiatives.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Sequenciamento de operações de chaveamento para restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica usando busca tabu e busca em vizinhança variável

AUTOR: MARCO AURÉLIO FERREIRA

ORIENTADOR: LEONARDO HENRIQUE FARIA MACEDO POSSAGNOLO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, área: Automação pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. LEONARDO HENRIQUE FARIA MACEDO POSSAGNOLO (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia de Energia / Faculdade de Engenharia e Ciências UNESP

Dr. MARIO ANDRES MEJIA ALZATE (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. LUCAS TELES DE FARIA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia e Ciências de Rosana - UNESP

Ilha Solteira, 04 de outubro de 2024

*Dedico este trabalho aos meus pais Marcos e Gracinha, meu irmão Leonardo, minha irmã
Patrícia, meus sobrinhos, sobrinhas; enfim à todas pessoas que dão sentido à vida.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado força, saúde, sabedoria e perseverança para continuar, pois não foi apenas em um único momento que me questionei, foram vários, e se não fosse Deus enviando pessoas para falar por Ele, muito provavelmente eu não estaria aqui.

Aos meus pais, Marcos e Gracinha, que fizeram o possível e o impossível para a formação minha, do Léo e da Pat.

Aos meus amigos, que são irmãos do coração, que sempre me auxiliaram com alguma dúvida ou me incentivaram a superar as dificuldades, especialmente, entre outros: Alan, Douglas, Joel, Márcio, Rogério e Tasso.

Aos docentes do PPGEE, que com tanto esmero, paciência, confiança e dedicação se propõem a compartilhar seus conhecimentos de maneira alegre e comprometida. Como o Professor Vilarreal (*in memoriam*) sempre considerava as demonstrações matemáticas: “muy tranquilo”. Assim como resolver os exercícios era “muy tranquilo”, e então ficávamos rindo, e a turma ficava por entender. Certa vez, me avalei para saber o quão próximo estava do conhecimento que ele considerava “muy tranquilo” e, como era de se esperar, estava bem distante, mesmo com a ajuda de um amigo matemático. Comentando isso com ele - Vila - ele me apresentou um caminho para a demonstração que eu não imaginava, e, após realizá-la, tive que concordar: “es muy tranquilo”.

Ao Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro, por todo ensinamento, incentivo e confiança durante o programa como Professor.

Ao Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo, não só pela orientação, acompanhamento, esclarecimento de dúvidas, sugestões, incentivo, confiança, amizade e todo o ensinamento, mas também por estender a mão em um momento bastante difícil, possibilitando que eu superasse as dificuldades.

Aos meus colegas do Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica (LaP-SEE), em especial, ao Gabriel Puerta, pela ajuda em todos os momentos em que precisei.

À companhia de pessoas incríveis que me fazem crescer e aprender cada vez mais. Agradeço a todos os familiares, amigos, professores e funcionários da FEIS-UNESP que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo 409062/2023-5.

“O segredo da força está na vontade.”

Giuseppe Mazzini

RESUMO

O problema de restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica (RSDEE) consiste em restabelecer a operação da rede após uma interrupção no fornecimento de energia, minimizando o tempo de indisponibilidade e maximizando a qualidade do serviço prestado. Este trabalho apresenta as meta-heurísticas especializadas de busca tabu (BT) e busca em vizinhança variável básica (BVNS) para determinar a sequência ótima de operações de chaveamento na RSDEE, considerando que as topologias inicial e final da rede são conhecidas. O problema é tratado de forma análoga ao problema de sequenciamento ótimo de tarefas, em que o objetivo é minimizar o custo da energia não suprida (ENS) durante o processo de restauração da rede. A estratégia proposta também inclui uma técnica de redução do número de cálculos de fluxo de potência para a avaliação de uma proposta de solução, visando aumentar a eficiência dos algoritmos propostos. Os resultados obtidos em um sistema de distribuição com 53 barras demonstram que a abordagem baseada no algoritmo BVNS é a mais eficaz na determinação de sequências factíveis de restauração, reduzindo o custo da ENS com um menor número de avaliações da função objetivo que a BT, evidenciado pela falta na barra 3.

Palavras-chave: busca tabu; busca em vizinhança variável básica; restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica; sequenciamento ótimo de tarefas.

ABSTRACT

The problem of power distribution system restoration (PDSR) involves reestablishing network operation after an interruption in energy supply, minimizing downtime, and maximizing service quality. This work presents specialized metaheuristics, namely tabu search (TS) and basic variable neighborhood search (BVNS), to determine the optimal sequence of switching operations in the PDSR, considering that the initial and final topologies of the network are known. The problem is approached similarly to the optimal task sequencing problem, where the objective is to minimize the cost of energy not supplied (ENS) during the network restoration process. The proposed strategy also includes a technique to reduce the number of power flow calculations to evaluate a solution proposal, aiming to increase the efficiency of the proposed algorithms. The results obtained using a 53-bus distribution system show that the BVNS-based approach is the most effective in determining feasible restoration sequences, reducing ENS costs with fewer objective function evaluations than TS, as evidenced by the outage at bus 3.

Keywords: basic variable neighborhood search; optimal task sequencing problem; restoration of electric power distribution systems; tabu search.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Algoritmo de busca tabu básico	31
Figura 2	Sistema de 53 barras	33
Figura 3	Sequencia de operação de chaveamento, representação de uma proposta solução	34
Figura 4	Sequencia de operação de chaveamento, proposta solução que gera laço	34
Figura 5	Sequencia de operação de chaveamento, proposta de solução inicial fac- tível	35
Figura 6	Algoritmo BVNS	40
Figura 7	Sistema de 53 barras	43
Figura 8	Comparação da evolução da incumbente para os algoritmos de BT e BVNS para falta na barra 3	45
Figura 9	Comparação da evolução da incumbente para os algoritmos de BT e BVNS para falta na barra 4	47
Figura 10	Comparação da evolução da incumbente para os algoritmos de BT e BVNS para falta na barra 11	48
Figura 11	Comparação da evolução da incumbente para os algoritmos de BT e BVNS para falta na barra 14	50
Figura 12	Comparação da evolução da incumbente para os algoritmos de BT e BVNS para falta na barra 45	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Simulação de falta na barra 3	45
Tabela 2	Simulação de falta na barra 4	46
Tabela 3	Simulação de falta na barra 11	48
Tabela 4	Simulação de falta na barra 14	50
Tabela 5	Simulação de falta na barra 45	52

LISTA DE ABREVIACES E SIGLAS

BT	Busca tabu
BVNS	<i>Basic variable neighborhood search</i>
FO	Fun objetivo
FP	Fluxo de potncia
GD	Gera distribuda
GDs	Geradores distribudos
MIPCSOIM	Modelo integrado de programa cnica de segunda ordem inteira mista
PCSOIM	Programa cnica de segunda ordem inteira mista
PLIM	Programa linear inteira mista
PNLIM	Programa no linear inteira mista
RSDEE	Restaura de sistemas de distribu de energia eltrica
SDEE	Sistema de distribu de energia eltrica
VNS	<i>Variable neighborhood search</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	O problema de restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica	14
1.2	Motivação do trabalho	15
1.3	Objetivos	15
1.4	Contribuições do trabalho	15
1.5	Estrutura do trabalho	16
2	RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS	17
2.1	Revisão bibliográfica de trabalhos que abordam o SOC	17
2.2	Conceitos básicos sobre sistemas de distribuição, reconfiguração, restauração e SOC	21
2.2.1	Reconfiguração topológica	22
2.3	Meta-heurísticas	24
2.4	Modelo matemático ilustrativo para o problema de SOC	25
3	BUSCA TABU ESPECIALIZADA PARA O SOC	27
3.1	Introdução	27
3.2	Busca tabu	28
3.2.1	Algoritmo busca tabu com memória de curto prazo	28
3.2.2	Algoritmo busca tabu com memória de longo prazo	29
3.2.3	Estratégias adicionais utilizadas em busca tabu	30
3.2.4	Proposta básica de busca tabu	30
3.2.5	Proposta de busca tabu especializada	31
3.3	Algoritmo de busca tabu proposto para o problema de SOC	32
3.3.1	Representação de uma proposta de solução	32
3.3.2	Geração de uma proposta de solução inicial	35
3.3.3	Avaliação da qualidade e da factibilidade de uma proposta de solução	35
3.3.4	Estrutura de vizinhança	37
3.3.5	Critério de parada	37
4	BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL BÁSICA PARA O SOC	38
4.1	Introdução	38

4.2	Busca em vizinhança variável básica	40
4.3	Algoritmo de busca em vizinhança variável proposto para o problema de SOC	41
4.3.1	Critério de parada	41
5	TESTES E RESULTADOS	42
5.1	Dados do sistema	42
5.2	Falta na barra 1	42
5.3	Falta na barra 3	44
5.4	Falta na barra 4	45
5.5	Falta na barra 11	46
5.6	Falta na barra 14	49
5.7	Falta na barra 45	50
5.8	Discussão dos resultados	52
6	CONCLUSÕES	53
	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica desempenha um papel essencial na vida cotidiana, fornecendo conforto, segurança e praticidade. Sua demanda contínua impulsiona o desenvolvimento dos sistemas de distribuição, que operam principalmente em topologia radial para minimizar os custos de proteção. Avanços são necessários para garantir um fornecimento confiável e de alta qualidade, atendendo às necessidades da sociedade moderna em diversos setores. A expansão e o desenvolvimento dos sistemas de distribuição contribuem para a manutenção da qualidade do serviço de energia elétrica, garantindo o funcionamento adequado dos diversos setores que dependem dela (Shen; Wu; Xue, 2019).

As faltas são eventos inevitáveis e frequentes em redes de transmissão e distribuição de energia elétrica. Condições climáticas adversas, sobrecargas e falhas nos equipamentos de proteção são algumas das várias causas que podem resultar na interrupção do fornecimento de energia elétrica (Puerta *et al.*, 2023). As faltas têm um impacto direto nos consumidores e mesmo uma breve interrupção no fornecimento de energia pode acarretar em consideráveis transtornos sociais e econômicos. O procedimento de religamento dos consumidores afetados deve ser executado da forma mais breve possível (Macedo *et al.*, 2020b). Nesse contexto, o problema de restauração em sistemas de distribuição de energia elétrica consiste em elaborar um plano de ação que restabeleça o fornecimento de energia aos consumidores afetados, minimizando alterações na topologia do sistema, ao mesmo tempo em que se busca reestabelecer o fornecimento para o maior número possível de consumidores (Souza; Puerta; Romero, 2020).

Com o plano de restauração em mãos, o desafio de ordenar cada operação de chaveamento seguindo uma certa estratégia define um outro problema combinatorial relacionado às contingências de faltas, o problema de sequenciamento de operações de chaveamento (SOC). Esse problema consiste em determinar a ordem ótima das operações de chaveamento necessárias para que a reconfiguração da topologia da rede. Na literatura é possível encontrar a sua resolução de forma conjunta com o problema de restauração (Marques; Delbem; London, 2017; Chen *et al.*, 2017; López *et al.*, 2017; López *et al.*, 2021), separadamente (Peralta; Leite; Mantovani, 2019; Dukovska; Morren; Sootweg, 2020; Arif; Cui; Wang, 2021; Poudel; Dubey, 2021) e também associada ao problema de reconfiguração (Badran *et al.*, 2017; Juma; Muriithi; Ngoo, 2018).

1.1 O problema de restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica

Os sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE) têm como função essencial distribuir a energia elétrica recebida do sistema de transmissão para pequenos, médios e grandes consumidores, mantendo padrões adequados de qualidade e confiabilidade conforme demanda dos consumidores. Embora seja um serviço público, é prestado por concessionárias e permissionárias do sistema de distribuição implementado por empresas privadas e por empresas públicas.

O SDEE radial é projetado com uma estrutura fracamente malhada, implicando na existência de chaves de interconexão entre os alimentadores primários para permitir a redistribuição de cargas entre esses alimentadores (Home-Ortiz *et al.*, 2021a). Essas chaves estão geralmente alocadas em pontos estratégicos e permanecem normalmente abertas para manter a operação radial do sistema. Elas podem ser utilizadas juntamente com outros dispositivos de seccionamento e outras chaves seccionadoras normalmente fechadas para alterar a configuração original do sistema elétrico (Home-Ortiz *et al.*, 2019).

O processo de reconfiguração topológica, também conhecido como reconfiguração de alimentadores, refere-se à prática de estabelecer uma nova disposição operacional para o sistema elétrico. Nesse contexto, o estado operacional do conjunto de dispositivos de chaveamento desse sistema determina sua configuração operacional. A realização de uma reconfiguração implica, então, em operações específicas de chaveamento, as quais podem ser de abertura ou fechamento, dependendo do estado inicial do sistema (Mahdavi *et al.*, 2023).

A reconfiguração topológica é conduzida por meio de operações de chaveamento apropriadas, tornando um procedimento essencial para a adaptação e otimização da infraestrutura elétrica. Essas operações podem ser conduzidas remotamente a partir do centro de controle da distribuição, quando se utilizam chaves telecomandadas; ou, podem ser realizadas localmente por uma equipe técnica de campo, especialmente no caso de chaves manuais. É importante observar que o uso de chaves manuais requer a presença física de equipes técnicas no local de instalação para realizar as operações de comutação necessárias. Portanto, a escolha entre chaves telecomandadas e chaves manuais depende das características específicas da intervenção necessárias no sistema elétrico e das condições operacionais vigentes. Essa flexibilidade na abordagem da reconfiguração proporciona uma resposta mais ágil e adaptável às demandas e contingências do sistema elétrico.

A topologia de operação de um sistema elétrico de distribuição radial é equivalente à topologia de uma árvore geradora, do ponto de vista da teoria de grafos. Por esse motivo, na literatura, os pontos de entrega de energia (subestações, transformadores) são simplificados em barras e representados por vértices e enquanto os circuitos que ligam esses pontos (os alimentadores e os dispositivos de seccionamento) são simplificados em ramos e representados por arestas. Em outras palavras, um ramo pode estar aberto ou fechado, dependendo se nesse ramo existe uma

chave alocada. Os ramos fechados e energizados são os ramos da árvore geradora, e os ramos abertos são os ramos de ligação da árvore geradora (Amasifen; Romero; Mantovani, 2005).

1.2 Motivação do trabalho

A literatura tem proposto métodos para resolver o problema de restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica (RSDEE) desde a década de 1980. A RSDEE é uma área de estudo nos centros de pesquisas notadamente por apresentar aplicação prática e demanda pelas empresas de distribuição de energia.

Como a RSDEE se trata de um problema complexo, a maioria dos trabalhos publicados propõe métodos que resolvem apenas em termos de reconfiguração, sem determinar a sequência em que as operações de chaveamento devem ocorrer: passagem da topologia inicial para a nova topologia proposta. É imprescindível determinar uma sequência factível de operações de chaveamento em propostas de reconfiguração para garantir a segurança operacional do sistema elétrico e a qualidade da energia fornecida. Este trabalho, desenvolverá uma sequência factível, visando o melhor cumprimento de exigências impostas às empresas distribuidoras, garantindo a confiabilidade do sistema, a qualidade do serviço prestado e a minimização dos custos operacionais.

1.3 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são:

- Desenvolver um algoritmo de busca tabu e um algoritmo busca em vizinhança variável básica especializados para resolver o problema de sequenciamento de operações de chaveamento na restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica;
- Testar os algoritmos implementados utilizando o sistema elétrico de 53 barras disponível na literatura com o objetivo de melhorar os índices de continuidade de fornecimento;
- Realizar uma análise teórica sobre a capacidade dos algoritmos para otimizar problemas de sistemas de energia elétrica com características similares ao problema estudado.

1.4 Contribuições do trabalho

As contribuições deste trabalho são:

- Métodos eficientes para resolver o problema de sequenciamento de operações de chaveamento para a restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica;

- Desenvolvimento de uma estratégia eficiente pra representação e avaliação de propostas de solução.

1.5 Estrutura do trabalho

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o tema de restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica. O Capítulo 3 apresenta o algoritmo de busca tabu especializado para resolver o problema de restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica. O Capítulo 4 apresenta o algoritmo de busca em vizinhança variável básica para o problema de restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica. O Capítulo 5 apresenta os resultados e discussões do trabalho. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

2 RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

Na literatura, o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica e o sequenciamento de operações de chaveamento (SOC), que constitui parte da solução da RSDEE, são tratados de maneira separada, sendo o SOC – na maioria dos casos – tratado de maneira superficial. Dessa forma, o tema de SOC será o ponto focal; e, para tal, este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o SOC, tanto no problema de reconfiguração quanto no problema de restauração de sistemas de energia elétrica, características dos sistemas de distribuição e finaliza com conceitos de meta-heurísticas. Na última seção deste capítulo é apresentado um modelo ilustrativo para o problema de SOC.

2.1 Revisão bibliográfica de trabalhos que abordam o SOC

O trabalho de (Badran *et al.*, 2017) aborda a minimização das perdas de energia em sistemas de distribuição por meio da reconfiguração otimizada da rede, com foco na minimização das perdas durante o processo de chaveamento entre a configuração inicial e final da rede, aspecto não considerado em pesquisas anteriores. Além disso, propõe um método que integra a reconfiguração da rede para condições variáveis de carga e de geração distribuída (GD). A abordagem envolve dois elementos principais: (i) a reconfiguração otimizada da rede com variações simultâneas de carga e saídas de GD, e (ii) a sequência ideal de operações de chaveamento para a transição entre as configurações. Utilizando a meta-heurística *firefly* como técnica de otimização, os autores realizaram simulações no MATLAB com a rede de distribuição radial de 33 barras do IEEE. Os resultados demonstraram a eficácia do método para determinar tanto a sequência de chaveamentos quanto a configuração de rede e a saída ideal das unidades de GD, contribuindo com uma solução integrada para minimizar as perdas durante o processo de reconfiguração, além de adaptar-se às condições operacionais variáveis da rede.

Os autores (Marques; Delbem; London, 2017) abordam o problema de restauração de serviço em sistemas de distribuição em situações de contingência, um dos desafios mais complexos na operação desses sistemas. A restauração é geralmente formulada como um problema de otimização com múltiplos objetivos e restrições que precisa ser resolvido rapidamente. Embora diversos métodos tenham sido propostos para solucionar o problema, muitos ainda apresentam limitações, como o tempo elevado de execução em sistemas de distribuição de grande porte

ou a negligência de aspectos importantes da restauração. O trabalho propõe um método baseado em algoritmos evolutivos multiobjetivos para superar essas limitações. Diferentemente de métodos existentes, o método proposto lida com redes de grande porte com tempos computacionais relativamente baixos e sem simplificação da topologia da rede, prioriza a operação de chaves controladas remotamente, prioriza o fornecimento de energia a três níveis de consumidores prioritários e fornece sequências de chaveamento. Uma formulação matemática do problema também é apresentada no trabalho. Diversos testes foram realizados para avaliar o método, considerando casos de falhas simples e múltiplas em redes de grande porte, com 631 a 5158 chaves.

A referência (Chen *et al.*, 2017) propõe um método de restauração de serviço em múltiplos passos temporais, focado em gerar uma sequência otimizada de ações de controle envolvendo chaves controláveis, sistemas de armazenamento de energia e GD. A formulação do problema, que leva em consideração as restrições operacionais intertemporais dessas tecnologias, visa minimizar o número de consumidores sem energia ao restaurar o sistema progressivamente, sem violar as limitações operacionais em cada etapa. Utilizando um modelo de programação linear inteira mista (PLIM), o método adapta-se às diferentes condições de operação e é validado por meio de estudos de caso realizados nas redes testes do IEEE modificadas de 13 e 123 nós. Os resultados demonstram a eficácia da abordagem para restaurar o sistema de maneira eficiente e coordenada, maximizando o atendimento aos consumidores.

O trabalho de (López *et al.*, 2017) propõe um modelo de programação não linear inteira mista (PNLIM) para definir a sequência de chaveamento ideal durante a restauração ou manutenção de sistemas de distribuição elétrica trifásicos desbalanceados. Após a identificação e isolamento da zona com falha pelo sistema de proteção, o modelo determina o estado das chaves controladas remotamente e das unidades de GD despacháveis, buscando desenergizar a seção com problemas e suprir a maior carga possível. A restauração é realizada ao longo de um horizonte discreto, garantindo que as restrições operacionais sejam respeitadas em cada etapa. Para facilitar a solução do problema, estratégias de linearização são aplicadas, transformando o modelo de PNLIM em um modelo de (PLIM), o que assegura a convergência para a solução ótima por meio de técnicas de otimização convexa. Os testes foram realizados em um sistema de distribuição radial trifásico desbalanceado com 123 nós, 12 chaves e três unidades de GD demonstrando que o modelo proposto é eficaz tanto na restauração do serviço quanto na minimização de áreas isoladas durante manutenções programadas.

O artigo (Juma; Muriithi; Ngoo, 2018) discute as perdas nos sistemas de energia elétrica, com destaque para as significativas perdas no sistema de distribuição em comparação ao restante da rede. A redução dessas perdas no sistema de distribuição é crucial para diminuir o consumo de energia, os custos e equilibrar a geração com a carga. A diminuição das perdas de potência contribui para aumentar a vida útil dos equipamentos elétricos e a confiabilidade da

rede de distribuição. Os autores indicam que uma maneira de reduzir as perdas de potência e o perfil de tensão sem custos adicionais é através da aplicação de uma sequência de chaveamento otimizada no sistema de distribuição radial. A reconfiguração da topologia da rede altera as correntes que fluem pelas linhas, minimizando as perdas de potência enquanto mantém as restrições operacionais. Neste estudo, foi proposto o algoritmo denominado *modified shark smell optimization*, para identificar a reconfiguração ideal da rede em um sistema IEEE de 33 barras. Os resultados foram avaliados e comparados com outros algoritmos de otimização, demonstrando a eficiência da abordagem proposta.

Os autores de (Peralta; Leite; Mantovani, 2019) propõem um método para resolver o problema de restauração de redes de distribuição de grande porte, com foco na presença de cargas de aquecimento que geram a condição de *cold load pickup* (CLPU), aumentando a complexidade do processo. O problema de restauração, formulado como um problema de PNLIM, envolve a energização do maior número possível de cargas em um intervalo de tempo curto, minimizando os danos causados por interrupções de energia. A abordagem inclui o ilhamento intencional de GD e o controle de tensão por meio de ajustes otimizados em bancos de capacitores e reguladores de tensão. Os resultados, obtidos em um sistema de teste com 53 nós e em um sistema real com 7052 nós, demonstram a eficácia do método na restauração eficiente da rede, mesmo diante de cenários complexos.

O estudo apresentado por (Dukovska; Morren; Slootweg, 2020) aborda o problema de restauração de serviço em redes de distribuição de média tensão, que possuem topologia malhada, mas operam de forma radial. Para isso, é proposto um modelo de PLIM que incorpora tanto restrições técnicas quanto considerações práticas do operador do sistema de distribuição. O modelo fornece uma sequência otimizada de etapas de chaveamento necessárias para restaurar o fornecimento de energia aos consumidores, auxiliando os operadores no processo de tomada de decisão no centro de controle do operador do sistema de distribuição. A eficácia do método é demonstrada por meio de um estudo de caso utilizando uma rede de distribuição real.

O trabalho de (Arif; Cui; Wang, 2021) propõe uma estrutura de otimização para a reconfiguração sequencial de redes de distribuição durante a restauração do sistema, levando em consideração diferentes tipos de dispositivos de chaveamento e processos de reparo. Diferentemente de estudos anteriores, a abordagem inclui as características, capacidades e limites operacionais de vários dispositivos, como disjuntores, religadores, seccionadores, chaves de carga e fusíveis, tornando o modelo aplicável na prática. O problema de operações de chaveamento é dividido em dois subproblemas de PLIM: o primeiro determina a topologia ótima da rede e estima o número de etapas para alcançá-la, enquanto o segundo gera a sequência de operações de chaveamento para coordenar os dispositivos. Além disso, um modelo de PLIM é usado para despachar equipes de reparo para corrigir falhas e substituir fusíveis queimados. Após a correção de uma falha, a topologia da rede é atualizada e o processo de chaveamento continua até

que todas as falhas sejam resolvidas. Para aumentar a eficiência computacional, um algoritmo de redução de rede foi desenvolvido, agrupando seções de linhas para simplificar a análise. O método foi validado nos sistemas teste IEEE de 123 e 8500 barras, demonstrando sua eficácia.

A referência (López *et al.*, 2021) apresenta um esquema centralizado de auto-reparo para sistemas de distribuição elétrica que visa identificar automaticamente a localização de falhas permanentes e restaurar o fornecimento de energia para o maior número possível de usuários. A restauração é realizada levando em conta restrições topológicas e operacionais, em um curto período de tempo e com mínima intervenção humana. A viabilidade de um esquema de auto-reparo real está relacionada ao contexto de redes inteligentes, onde variáveis elétricas e topológicas são monitoradas e controladas remotamente por meio de sistemas *supervisory control and data acquisition* SCADA e medidores inteligentes. O artigo descreve o projeto e a simulação de um esquema de auto-reparo que, após detectar uma falha permanente, executa funções como estimação de estado trifásica via programação não linear, previsão de carga de curto prazo utilizando um modelo autorregressivo integrado de média móvel (ARIMA), localização de falhas com base em matriz de impedância e um método de restauração de serviço por meio de PNLIM. O esquema de auto-reparo foi desenvolvido como um sistema de informações geográficas (GIS) com uma interface gráfica de usuário (GUI) em Python. As simulações foram realizadas em um sistema de distribuição trifásico desbalanceado real, demonstrando que a proposta é adaptável, robusta, escalável e eficiente para aplicações no mundo real.

Os autores (Poudel; Dubey, 2021) focam na melhoria da confiabilidade dos sistemas de distribuição de energia, reconhecendo a importância de estratégia eficiente de restauração de serviço dentro de um sistema de gerenciamento de distribuição para facilitar a implementação de redes inteligentes auto-reparadoras. Embora as novas tecnologias de redes inteligentes, como GD e chaves controladas remotamente, aumentem a capacidade de auto-reparo e acelerem a recuperação, elas também introduzem complexidades adicionais, especialmente nas condições de CLPU. Para abordar esses desafios, o estudo propõe uma nova estrutura de restauração em duas etapas, que elabora um plano de restauração abrangendo tanto a reconfiguração de alimentadores tradicionais quanto métodos deilhamento assistido por GD. A segunda etapa da proposta gera uma sequência otimizada de operações de chaveamento para restaurar rapidamente o sistema afetado. O problema é formulado como um problema de PLIM que considera a conectividade do sistema, restrições operacionais e modelos de CLPU. Através de um caso de teste com múltiplos alimentadores, os resultados demonstram que o método proposto é eficaz na utilização de todos os recursos disponíveis para restaurar rapidamente o serviço e fornecer uma sequência de ações de chaveamento que auxilia o operador a alcançar a configuração desejada de forma otimizada.

2.2 Conceitos básicos sobre sistemas de distribuição, reconfiguração, restauração e SOC

Um sistema de distribuição elétrica operando em configuração radial é concebido com uma estrutura fracamente malhada (Teles; Macedo; Romero, 2020). Isso implica na presença de chaves de interconexão entre os alimentadores primários, permitindo o rearranjo topológico do sistema e facilitando a redistribuição de cargas entre esses alimentadores. Essas chaves são tipicamente posicionadas em pontos estratégicos, mantendo-se geralmente abertas para preservar a operação radial do sistema (Home-Ortiz *et al.*, 2022). Em conjunto com outros dispositivos de seccionamento e chaves seccionadoras normalmente fechadas, essas chaves podem ser utilizadas para modificar a configuração original do sistema elétrico. O processo de estabelecer uma nova configuração operacional é denominado reconfiguração topológica ou reconfiguração de alimentadores (Montsutsumi *et al.*, 2017). O estado operacional do conjunto de dispositivos de chaveamento do sistema elétrico determina sua configuração operacional, e a alteração desse estado por meio de uma operação de chaveamento (abertura ou fechamento, dependendo do estado inicial) é o procedimento essencial para a reconfiguração topológica do sistema elétrico (Macedo *et al.*, 2018).

A reconfiguração envolve a troca adequada de um ramo fechado por outro aberto, garantindo a preservação de uma estrutura totalmente conectada e acíclica (livre de malhas) (Macedo; Romero, 2015b). No entanto, ao lidar com a reconfiguração de um sistema de distribuição de energia elétrica radial, é imperativo não apenas contemplar a viabilidade de uma estrutura conectada e sem ciclos, mas também levar em consideração os requisitos físicos e operacionais específicos do sistema elétrico (Macedo *et al.*, 2022).

Ao incorporar a conformidade com os requisitos físicos e operacionais do sistema elétrico em uma proposta de configuração, o objetivo é desenvolver soluções que atendam aos critérios de segurança operacional e à qualidade do serviço prestado. A qualidade do fornecimento de energia elétrica é avaliada pela conformidade dos níveis de tensão com as faixas regulamentadas pelas agências reguladoras do setor elétrico, de acordo com a tensão nominal de fornecimento em cada sistema. Níveis de tensão que excedem os valores mínimo e máximo permitidos caracterizam uma operação deficiente e indesejada. A segurança operacional está vinculada aos níveis de carga dos componentes do sistema elétrico. Nesse contexto, evitar sobrecargas é crucial, uma vez que podem resultar em danos aos equipamentos da rede, interrupções no fornecimento de energia elétrica e degradação na qualidade do serviço. As distribuidoras têm a responsabilidade de assegurar a continuidade do serviço com qualidade e segurança para os consumidores, sendo sujeitas a penalizações conforme índices regulatórios do setor elétrico, como os indicadores coletivos de continuidade duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC) e frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora (FEC). O nível de confiabilidade de um SDEE é determinado por esses e outros indicadores (Macedo *et al.*, 2020a).

2.2.1 Reconfiguração topológica

A reconfiguração topológica de sistemas elétricos de distribuição não se limita apenas à troca adequada de um ramo fechado por outro aberto para manter uma estrutura completamente conectada e não cíclica (sem malhas) (Macedo; Romero, 2015a; Feiteira; Macedo; Romero, 2018). Também representa um procedimento crucial no planejamento operacional de curto prazo. A necessidade de reconfigurar o sistema pode surgir em várias condições e para diversas finalidades. Essas condições incluem o planejamento da reconfiguração do sistema durante o estado normal de operação, em estado emergencial e em estado restaurativo (Bortoloci; Macedo; Romero, 2022).

A reconfiguração topológica além de se tornar uma prática valiosa para aprimorar os índices de continuidade do serviço e a confiabilidade do sistema, elevando a qualidade do serviço oferecido e reduzindo custos operacionais ao longo tempo, também pode expressar a maturidade na gestão dos equipamentos do SDEE. Dentre os objetivos da reconfiguração estão o restabelecimento do fornecimento de energia elétrica, o aprimoramento do desempenho operacional do sistema, a implementação de projetos de expansão e a realização de manutenções preventivas (Home-Ortiz *et al.*, 2021b). As estratégias de reconfiguração fundamentam-se na transferência de cargas entre os alimentadores primários e essa transferência deve ser realizada sem violar requisitos topológicos, físicos e operacionais do sistema elétrico, atendendo às exigências e normas definidas pelas agências reguladoras do setor elétrico, assegurando a plena conectividade do sistema sempre que possível. Deve-se notar que, como discutido em (Flores; Macedo; Romero, 2021), um sistema elétrico com todos os ramos operando não é, necessariamente, aquele com maior capacidade de transmissão de energia elétrica.

O não cumprimento das restrições de carga pode levar o sistema elétrico a entrar em um estado restaurativo, caracterizado pela desenergização de cargas e persistindo até que o sistema possa retomar sua operação normal. A interrupção no fornecimento pode ser temporária ou permanente. A interrupção permanente no serviço de fornecimento de energia elétrica em um sistema de distribuição radial pode ocorrer em duas situações: de maneira programada (previamente planejada e agendada pela concessionária), como em casos de manutenção preventiva e execução de projetos de expansão; ou de maneira não programada, devido à vulnerabilidade do sistema, à falhas de equipamentos e/ou outras contingências (Vargas *et al.*, 2021b). Essas contingências podem ser causadas por danos ou falhas em equipamentos, atos de vandalismo ou eventos naturais, resultando em perturbações na rede elétrica que podem ocasionar interrupções temporárias ou permanentes. As interrupções temporárias podem ser resolvidas pelo próprio sistema de proteção da rede, enquanto as interrupções permanentes exigem um plano de restabelecimento (Vargas *et al.*, 2021a).

Quando ocorre uma interrupção não programada devido a contingências, ela é caracterizada como uma falta. O sistema de proteção é encarregado de identificar e corrigir faltas conside-

radas temporárias, desligando e religando o sistema a montante da falta, permitindo que ele retorne à operação normal após uma breve interrupção. Contudo, quando as faltas são consideradas permanentes, o sistema entra de forma definitiva em estado restaurativo e o retorno à operação normal depende das ações realizadas pelo centro de controle do SDEE sob a responsabilidade do operador do sistema. Nos casos de interrupção permanente devido a contingências, os procedimentos adotados pelo centro de controle são, resumidamente:

- Detecção, classificação e localização da falta.
- Definição e abertura de chaves adjacentes ao local da falta para o isolamento desse local para reparo por equipe técnica.
- Tentativa de elaboração de um plano de restabelecimento para o período necessário de reparo.
- Execução do plano elaborado, se existente.
- Ação de retorno do sistema à operação normal após a correção do defeito.

O objetivo da resolução do problema de restauração consiste em desenvolver um plano de restabelecimento ótimo para minimizar os impactos adversos causados pela interrupção do fornecimento no sistema elétrico (Carrion *et al.*, 2024). Um plano de restabelecimento ótimo envolve a determinação de uma ou mais configurações operacionais ideais para o sistema no estado restaurativo, bem como a definição de sequências viáveis de operações de chaveamento que assegurem uma transição segura da configuração interrompida para a respectiva configuração restaurativa ótima. A sequência de operações de chaveamento pode seguir critérios de otimização para garantir eficiência e eficácia no restabelecimento do sistema.

A condição inicial para tentar restabelecer a energia da parcela desenergizada é a existência de alimentadores vizinhos que possam transferir cargas. Durante o processo de restauração, o objetivo é transferir as cargas desenergizadas de um alimentador primário para outros alimentadores adjacentes capazes de atender a essas cargas adicionais ou o próprio alimentador através de uma rota alternativa. A transferência de cargas desenergizadas para um alimentador de suporte disponível pode aumentar a carga nos circuitos desse alimentador levando à possibilidade de violação da capacidade nominal do mesmo. Da mesma forma, os níveis de tensão podem ficar fora dos requisitos de conformidade fornecidos para consumidores localizados principalmente nas bordas do circuito – regiões terminais de um alimentador muito carregado. Dessa forma, na reconfiguração restaurativa, dependendo do cenário de interrupção: do setor isolado e do carregamento do sistema durante o período restaurativo, existe uma considerável probabilidade de violação dos requisitos físicos e operacionais do sistema elétrico. Nesse contexto, o método de resolução deve considerar a possibilidade de propor soluções com cortes de carga para garantir a factibilidade operacional do sistema.

A exigência de factibilidade operacional e a possibilidade de inexistência de circuitos alimentadores alternativos comprometem a garantia de plena conectividade do sistema elétrico, por isso a exigência normal de conectividade (que é uma restrição topológica) deve ser relaxada para a estratégia de reconfiguração de restabelecimento. Relaxar a exigência de conectividade do sistema elétrico significa permitir a desenergização de cargas na proposta de reconfiguração. Devido ao caráter combinatório do problema e à possibilidade aumentada de infactibilidade operacional, o processo de resolução do problema de restauração pode se tornar oneroso, sobretudo em casos críticos de interrupção (Macedo *et al.*, 2021).

Embora possa ser permitido o descumprimento da restrição de carga em uma proposta de configuração restaurativa para a factibilidade operacional do sistema, quanto maior o restabelecimento, melhores serão os índices de confiabilidade do sistema e de satisfação dos consumidores; e, menores serão os prejuízos financeiros para as distribuidoras decorrentes do não faturamento da energia não suprida (ENS) - decorrentes de possíveis multas ou ressarcimentos pela interrupção do serviço aos consumidores. Por isso, o objetivo da restauração deve ser reduzir ao máximo a área desatendida e também reduzir ao máximo o tempo de interrupção do serviço aos consumidores.

2.3 Meta-heurísticas

A utilização dos métodos exatos para resolução de problemas via algoritmos computacionais enfrenta um grande desafio quando o objetivo é fornecer soluções exatas, notadamente para classe de problemas NP-difíceis de grande porte. Independentemente de condições especiais ou propriedades particulares, a solução de um problema NP-difícil exigirá, em última análise, consumo exponencial de processamento em tempo ou em memória em função do tamanho da entrada de dados desses problemas. Problemas de grande porte e com entrada de dados constituída por um número significativo de variáveis, em um caso geral, provavelmente exigirão uso de tempo de processamento ou de memória computacional (ou ambos) proibitivos para alcançar uma solução exata. Diante da limitação desses recursos computacionais, constata-se que os computadores e métodos algorítmicos atuais possuem uma deficiência tecnológica implícita para alcançar soluções exatas eficientemente, em um caso geral, para problemas NP-difíceis de grande porte reais e outros ainda mais complexos, como é o caso do problema de SOC.

Diante da insuficiência da resposta dos métodos exatos, nas últimas décadas foram concentrados significativos esforços no desenvolvimento e aperfeiçoamento de estratégias aproximadas e eficientes para a solução de problemas NP-difíceis de grande porte. De fato, tais procedimentos aproximados foram denominados de heurísticas. O conceito de heurística é amplo e permite acepções como: atalho mental que permite às pessoas resolverem problemas e fazerem julgamentos rápidos e eficientes. No contexto deste estudo pode-se definir heurística como: uma técnica computacional aproximada que visa alcançar uma solução avaliada como aceitável

para um dado problema que pode ser representado em um computador, utilizando um esforço computacional considerado razoável, sendo capaz de garantir, em determinadas condições, a viabilidade ou a otimalidade da solução encontrada (Goldbarg; Goldbarg; Luna, 2017).

Originado do estado da arte, as classes de estratégias amplas voltadas a direcionar o processo de construção de heurísticas são denominadas heurísticas modernas ou meta-heurísticas. No contexto deste estudo, pode-se definir: métodos ao longo do tempo que incluam qualquer procedimento de resolução de problemas para resolver a tarefa de superar ótimos locais em um espaço de solução complexo, especialmente quando tais procedimentos utilizam uma ou mais estruturas de vizinhança como um modo de definir movimentos admissíveis entre soluções ou para constituir processos sistemáticos de construção e destruição de soluções (Glover; Kochenberger, 2003); ou ainda: trata-se de uma arquitetura geral de regras que, formadas a partir de um tema em comum, podem servir de base para o projeto de uma ampla gama de heurísticas computacionais (Goldbarg; Goldbarg; Luna, 2017).

Pelo exposto, o presente trabalho utilizará as meta-heurísticas busca tabu e busca em vizinhança variável básica para resolver o problema de SOC em sistemas de distribuição.

2.4 Modelo matemático ilustrativo para o problema de SOC

O problema de SOC consiste em determinar a ordem ótima das operações de chaveamento que são necessárias para a reconfiguração topológica de sistemas elétricos de distribuição radiais. Para resolver esse problema, é necessário ter conhecimento prévio tanto da topologia inicial do sistema quanto das operações de chaveamento necessárias para estabelecer a nova configuração. O objetivo é alcançar a mesma topologia final proposta na reconfiguração. No entanto, as topologias intermediárias resultantes das operações de chaveamento são desconhecidas e devem ser determinadas. Essas topologias intermediárias são geradas seguindo a sequência estabelecida de operações de chaveamento. Portanto, o desafio consiste em encontrar a transição ótima da configuração inicial do sistema para a nova configuração operacional, o que se configura como um problema de natureza combinatória. A complexidade desse problema reside no fato de que é necessário conhecer o estado de operação do sistema em cada topologia gerada a partir da proposta de reconfiguração, a fim de encontrar soluções viáveis.

O critério de otimização deste problema consiste em minimizar a ENS durante o processo de transição entre as diferentes topologias do sistema elétrico. O objetivo primordial é reduzir ao mínimo possível a interrupção no fornecimento de energia, a fim de minimizar os prejuízos decorrentes dessa descontinuidade no serviço. Para alcançar esse objetivo, as operações de chaveamento são realizadas exigindo um determinado intervalo de tempo. Nesse problema em específico, os parâmetros de tempo associados a cada operação de chaveamento desempenham um papel essencial no cálculo da ENS, que é incorporada à função objetivo.

A topologia inicial e a topologia final do sistema elétrico devem ser operacionalmente factíveis e aderir a uma estrutura radial. Além disso, é necessário que a sequência ideal de operações de chaveamento resulte em topologias intermediárias também operacionalmente factíveis e radiais. A segurança e a qualidade do serviço ao longo de todo o processo de transição são fundamentais, e uma sequência de operações de chaveamento é considerada factível quando cada operação atende aos requisitos operacionais estabelecidos e mantém a estrutura radial do sistema.

Os requisitos operacionais definidos são os seguintes: não violar a capacidade máxima de corrente nos ramos, não exceder a capacidade máxima de carga das subestações, não ultrapassar os limites de tensão permitidos para a operação do sistema e cumprir as duas leis de Kirchhoff, que são leis naturais no campo da eletricidade. Então, além de atender aos requisitos operacionais, o ordenamento das operações de chaveamento precisa atender ao objetivo principal de minimizar a ENS da rede. Um modelo ilustrativo para o problema de SOC é apresentado em (1)–(7).

$$\text{minimizar } v = \sum_{i \in \Omega_N} \sum_{t \in \Omega_T} \Delta_t P_i^D (1 - y_{i,t}) \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\text{Duas leis de Kirchhoff em cada intervalo de tempo} \quad (2)$$

$$\text{Capacidades dos ramos em cada intervalo de tempo} \quad (3)$$

$$\text{Limites de tensão nos nós em cada intervalo de tempo} \quad (4)$$

$$\text{Capacidades das subestações em cada intervalo de tempo} \quad (5)$$

$$\text{Configuração da rede radial em cada intervalo de tempo} \quad (6)$$

$$\text{Topologias inicial e final conhecidas} \quad (7)$$

Nesse modelo ilustrativo, Ω_N é o conjunto de nós do sistema e Ω_T é o conjunto de intervalos de tempo em que cada operação de chaveamento é realizada. A função objetivo v representa a ENS durante o período restaurativo, em que Δ_t é a duração do intervalo de tempo t , P_i^D é a demanda de potência ativa no nó i e $y_{i,t}$ é o estado de operação do nó i no intervalo de tempo t , e vale 1 se o nó estiver conectado ao sistema, com sua demanda atendida, e 0 em caso contrário.

Todas as condições operacionais do sistema podem ser verificadas uma vez conhecida a topologia da rede após resolver-se um problema de fluxo de potência para redes radiais (Zimmerman; Murillo-Sanchez; Thomas, 2011). Dessa forma, deve-se verificar as condições operacionais da rede, fornecidas pelo algoritmo de fluxo de potência, e as restrições topológicas, que exigem que a configuração do sistema elétrico seja radial.

3 BUSCA TABU ESPECIALIZADA PARA O SOC

3.1 Introdução

A busca tabu (BT), técnica de busca local conhecida como *tabu search*, foi concebida por (Glover, 1986) e tornou-se uma técnica importante em otimização e resolução de problemas, ainda que não tenha uma analogia direta com um processo natural em específico como os algoritmos genéticos, sendo considerada uma meta-heurística eficaz para explorar espaços de solução complexos.

O termo *tabu* do vocábulo *busca tabu* refere-se à cultura polinésia, em que algo tabu é algo sagrado ou proibido. Na BT certas ações ou movimentos são marcados como tabu, denotando que não podem ser executados temporariamente ou em certas circunstâncias a fim de evitar ciclos indesejáveis ou soluções repetidas. Embora o termo *tabu* possa não representar totalmente a essência da abordagem, tornou-se tradicional e amplamente reconhecido na literatura. A BT é um exemplo de como conceitos de diferentes áreas, como cultura e matemática, podem se interconectar e inspirar novas abordagens e técnicas.

A BT pode ser utilizada tanto em problemas de natureza determinística quanto em problemas probabilísticos, isso é uma característica interessante da BT. Ela pode ser implementada de forma determinística, garantindo que certas ações sejam sempre tomadas em determinadas circunstâncias; ou, de forma probabilística, introduzindo elementos de aleatoriedade para explorar diferentes partes do espaço de solução. Essa flexibilidade permite que a BT seja adaptada para uma ampla possibilidade de problemas e contextos.

O conceito de configurações de variáveis na BT refere-se aos diferentes arranjos ou estados que as variáveis podem assumir durante o processo de busca. Essas configurações representam as soluções candidatas, ou propostas de solução, que são examinadas e manipuladas na busca pela solução ótima ou satisfatória para o problema em questão.

A BT caracteriza-se como método iterativo, focado em uma busca local, com o objetivo de escapar de ótimos locais. Para isso, utiliza uma estratégia de proibir (ou penalizar) certos movimentos, que são armazenados em uma estrutura denominada *lista tabu*. Essa lista é usada para limitar os próximos movimentos, evitando ciclos e soluções repetidas (Glover, 1986).

3.2 Busca tabu

A BT representa uma extensão dos métodos clássicos de busca local, cujo objetivo principal é explorar soluções ou subconjuntos de soluções dentro de um conjunto predefinido permitindo que o método de busca local supere os ótimos locais.

Uma abordagem comum para implementar um algoritmo de busca local é partir de uma solução corrente e explorar toda a vizinhança dessa solução em busca de uma solução com um valor menor (no caso de problemas de minimização). Se uma solução vizinha com um valor menor for encontrada no final da exploração da vizinhança, ela se torna a nova solução corrente e o algoritmo continua a busca a partir dela. No entanto, caso não seja possível encontrar uma solução vizinha com um valor menor, a solução corrente é considerada um ótimo local em relação à vizinhança adotada (Glover, 1990).

A BT se diferencia dos algoritmos de busca local em dois aspectos fundamentais.

1. Em primeiro lugar, ao invés de se restringir apenas à melhor solução vizinha, a BT também considera visitar soluções vizinhas que podem ser ligeiramente piores. Isso implica na possibilidade de degradação da qualidade da função objetivo, o que é benéfico para evitar ótimos locais, sub-ótimos e explorar regiões mais promissoras do espaço de busca.
2. Em segundo lugar, a BT não se limita a uma estrutura de vizinhança estática. Ela introduz uma nova estrutura de vizinhança que varia dinamicamente em termos de sua estrutura e dimensão ao longo de todo o processo de otimização. Essa abordagem permite que a BT conduza uma busca eficiente e inteligente.

Os elementos da vizinhança são determinados de várias maneiras, incluindo o uso de uma lista tabu para armazenar configurações proibidas, evitando ciclos retornando às configurações já visitadas; além disso, a BT utiliza estratégias para reduzir o tamanho da vizinhança ou da lista de configurações candidatas. Essas estratégias têm como objetivo diminuir o esforço computacional necessário em cada transição. A BT também pode empregar lista de soluções de elite, oscilação estratégica, o método de *path relinking* para caracterizar e descobrir novas configurações candidatas, além de redefinir a estrutura de vizinhança durante o processo de otimização (Glover, 1997).

3.2.1 Algoritmo busca tabu com memória de curto prazo

Estratégias baseadas em memória são a marca registrada das abordagens de BT (Glover; Laguna, 1997). A BT básica pode ser vista simplesmente como a combinação de busca local com memória de curto prazo que faz com que as informações das últimas transições do algoritmo sejam armazenadas. Essa informação recente pode ser armazenada de forma completa,

considerando que pode apresentar problemas de memória e grande esforço computacional e também podem ser armazenados somente os atributos das configurações, que seria a proposta mais viável por exigir pouca memória para armazenamento e facilidade de manipulação e verificação. Entretanto, existem algumas desvantagens, pois algumas configurações de qualidade podem estar temporariamente proibidas resultantes do compartilhamento de atributos proibidos com configurações já visitadas. Este problema pode ser solucionado eliminando a proibição após k transições do algoritmo, com o risco de surgir ciclos, ou utilizando uma estratégia chamada critério de aspiração, que consiste em remover a proibição de um movimento se esse movimento produz uma solução melhor do que a melhor obtida até então, sendo que nesse caso existe a certeza de que a nova solução ainda não foi visitada.

3.2.2 Algoritmo busca tabu com memória de longo prazo

A BT se torna significativamente mais forte quando se estabelece a memória de longo prazo em suas estratégias (Glover; Laguna, 1997). A memória de longo prazo é usada para direcionar a busca para regiões inexploradas. Existem três aspectos fundamentais relacionados com a memória de longo prazo, como a memória baseada em frequência, a estratégia de intensificação e diversificação.

A memória baseada em frequência tem como objetivo armazenar a informação sobre a frequência com que um atributo é escolhido para gerar ou participar da composição das configurações durante o processo de busca. Existem dois tipos de memória baseadas em frequência: frequência de transição, que armazenam a quantidade de vezes em que um atributo é retirado ou adicionado para formar novas configurações; e, frequência de residência ou permanência, que armazena a informação sobre o número de vezes em que um atributo permanece nas novas configurações ou em todas as configurações geradas. Essas informações podem ser utilizadas para penalizar ou incentivar configurações constituídas por determinados atributos.

A estratégia de intensificação no algoritmo de BT visa aprofundar a exploração em torno da solução corrente, focando em vizinhanças que já mostraram desempenho promissor. A intensificação permite que o algoritmo se concentre em áreas onde boas soluções foram encontradas, aumentando a probabilidade de encontrar uma solução ótima global, embora seja importante equilibrá-la com a exploração para evitar a convergência prematura em soluções subótimas.

A estratégia de diversificação se qualifica a sair de uma região do espaço de busca; e, de forma intencional, chegar em uma região distante para novamente realizar algum processo de intensificação.

3.2.3 Estratégias adicionais utilizadas em busca tabu

Estruturas de BT mais bem elaboradas podem ser construídas usando outros operadores existentes, tais como a lista de soluções de elite, oscilação estratégica, *path relinking*, entre outros (Glover, 1997).

Configurações de elite em BT podem ser usadas de várias formas, seja para reiniciar um processo de intensificação ou para gerar configurações atrativas através de *path relinking*, que é uma técnica que gera novas soluções explorando trajetórias que conectam soluções de elite, ou seja, ela permite gerar novas configurações usando como base duas ou três configurações de qualidade. A forma mais simples de implementar *path relinking* é copiando uma parcela dos atributos ou elementos de uma configuração de elite em outra configuração de elite.

A técnica de oscilação estratégica orienta os movimentos em relação a um nível crítico, identificado por um estágio de construção ou por um intervalo escolhido de valores funcionais. Esta técnica geralmente é usada quando foi atingido um nível crítico em que o método de BT normalmente pararia. Em vez de parar quando este limite é atingido, são modificadas as regras para selecionar movimentos, para fugir da região limitada pelo nível crítico. Após isso, muda-se novamente as regras de escolha de configurações candidatas tanto no afastamento como no retorno ao nível crítico, isto é, da fronteira do espaço de busca.

3.2.4 Proposta básica de busca tabu

A estrutura geral do algoritmo de BT básico é apresentada na Figura 1. Na proposta básica, os tópicos críticos estão relacionados:

1. Ao desenvolvimento da estrutura de vizinhança, utilizada na Etapa 1;
2. À Etapa 2, na qual é realizada a transição para outra proposta de solução.

O algoritmo de BT sempre realiza essa transição, mesmo que a solução vizinha escolhida seja de pior qualidade que a solução corrente. Entretanto, uma solução previamente visitada deve ser evitada (Glover, 1997).

Na proposta tradicional, a estratégia utilizada para evitar o retorno a uma solução previamente visitada é realizada indiretamente. O algoritmo de BT não armazena as soluções já visitadas para evitar o retorno a elas. Em vez disso, ele armazena atributos, geralmente informações que permitem que a transição seja feita. Assim, o atributo permanece proibido por um número especificado de iterações para evitar um movimento reverso e, portanto, evitar revisitar uma solução. Esses atributos são armazenados em uma lista de atributos proibidos. Entretanto, enquanto um atributo permanecer proibido, soluções de alta qualidade que não podem ser utilizadas para fazer a transição podem aparecer no processo de busca, pois podem compartilhar um

Figura 1 - Algoritmo de busca tabu básico

Inicialização: Encontre uma proposta de solução inicial que se torna a solução corrente.

Repita os seguintes passos até que o critério de parada seja alcançado:

1. Identifique e ordene todas as propostas de solução vizinhas da solução corrente por qualidade, com a melhor proposta colocada em primeiro lugar;
2. Efetue a transição da proposta de solução corrente para a melhor solução vizinha não visitada anteriormente;
3. Atualize a proposta de solução corrente e a incumbente.

Fonte: (Glover, 1997).

atributo proibido com uma solução visitada recentemente. Para contornar essa limitação, foi inventado o critério de aspiração, que é uma medida da qualidade de uma proposta de solução. Se um vizinho que possui o atributo proibido aparecer, mas cumprir o critério de aspiração, então a proibição deve ser eliminada e a transição deve ser realizada (Glover, 1997).

3.2.5 Proposta de busca tabu especializada

Na Etapa 2 da Figura 1, o algoritmo de BT utiliza uma lista de atributos proibidos para evitar retornar para uma solução já visitada e um critério de aspiração para aceitar soluções proibidas mas altamente promissoras. Entretanto, esse aspecto apresenta duas limitações que nem sempre são eficientemente contornados: (i) pode ser difícil calibrar os parâmetros relacionados à lista de atributos proibidos e ao critério de aspiração, e (ii) não há garantia completa de evitar ciclos, ou seja, de impedir a revisitação de uma proposta de solução.

A justificativa para desenvolver um algoritmo de BT que evite, de forma indireta, a possibilidade de revisitar uma solução está relacionada às questões de memória e tempo de processamento envolvidos no armazenamento e verificação de todas as soluções previamente visitadas (Glover; Laguna, 1997). Essa premissa é verdadeira para praticamente todos os problemas de otimização e permanece válida para diversos tipos de problemas de pesquisa operacional, nos quais geralmente há milhões ou dezenas de milhões de transições a serem realizadas. No entanto, para muitos problemas de otimização em sistemas de energia elétrica, especialmente para o problema de SOC, essas premissas não são mais aplicáveis: no problema de SOC, o número de transições em um algoritmo de BT é da ordem de dezenas ou centenas. Por esse motivo, este trabalho propõe um algoritmo de BT especializado que não utiliza lista de atributos proibidos nem critério de aspiração.

A principal modificação é armazenar apenas a solução corrente, em vez de manter um

conjunto de soluções de alta qualidade, como descrito no *framework* original apresentado em (Glover; Laguna, 1997). Essa abordagem impede ciclos quando o processo é reiniciado a partir da solução corrente (Yamamoto *et al.*, 2024; Alves; Macedo; Romero, 2019).

Adicionalmente, utiliza-se uma estratégia de *restart* para a solução incumbente após um certo número de avaliações de vizinhanças sem melhoria na solução corrente (Yamamoto *et al.*, 2024). Neste processo o *restart* é realizado após três análises de vizinhança sem melhoria na solução corrente. Esse processo visa evitar que a busca prossiga por caminhos não promissores.

3.3 Algoritmo de busca tabu proposto para o problema de SOC

Nesta seção são discutidos os detalhes do algoritmo de BT proposto para a resolução do problema de SOC.

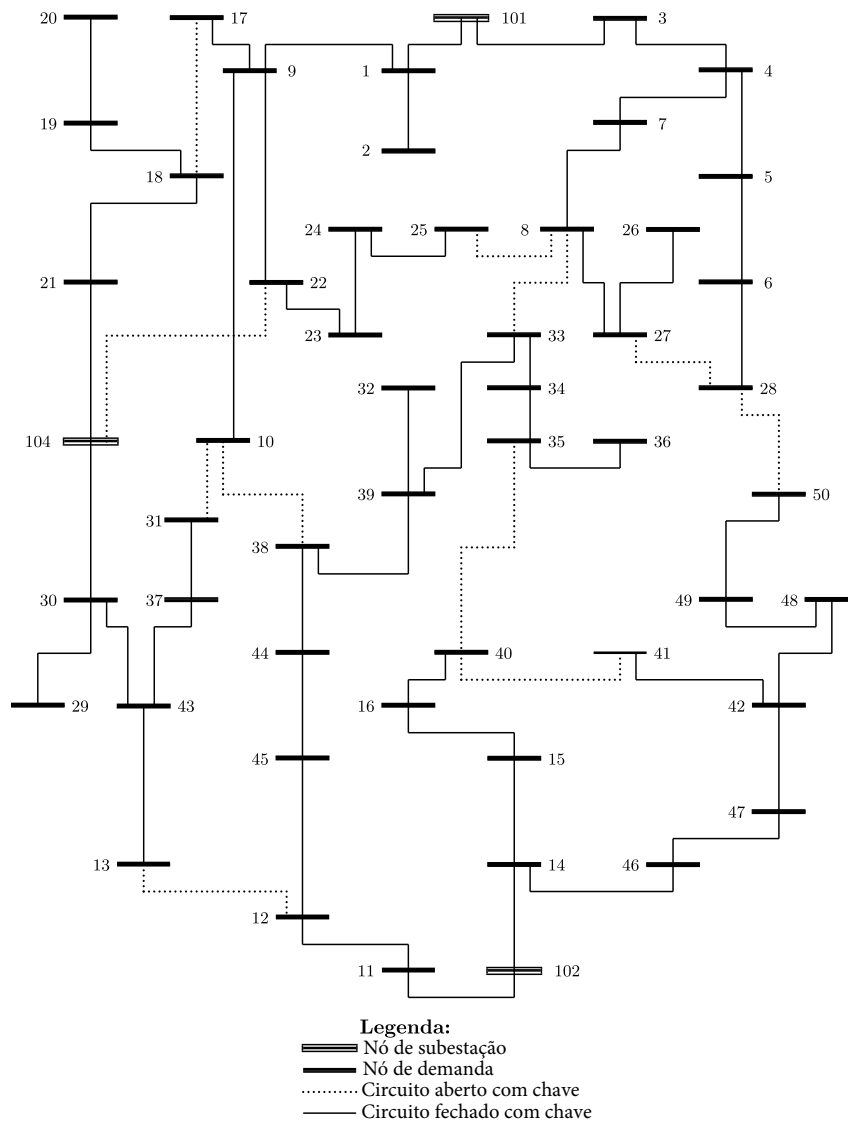
3.3.1 Representação de uma proposta de solução

O problema de SOC se assemelha ao problema de sequenciamento de tarefas, em que as tarefas devem ser processadas em sequência em uma máquina, com o objetivo de se minimizar o atraso total na entrega. Assim, pode-se tratar o problema de SOC como um problema de sequenciamento já abordado na literatura de pesquisa operacional.

A Figura 7 ilustra a topologia inicial do sistema de 53 barras que será testado nesse trabalho. Suponha que um sistema de distribuição, que precisa ser restaurado, requer a manipulação de n chaves. Nesse caso, uma proposta de solução pode ser armazenada em um vetor de tamanho n . Ilustra-se a forma de se representar uma proposta de solução utilizando o exemplo de falta no nó 3 para o sistema de 53 barras da Figura 7. Para facilitar a implementação, as manobras de chaves são inicialmente numeradas de forma sequencial e arbitrária. Por exemplo, uma enumeração possível seria a seguinte:

- Ramo 5-4 (deve ser aberto) $\Rightarrow$ manobra 1.
- Ramo 27-8 (deve ser aberto) $\Rightarrow$ manobra 2.
- Ramo 26-27 (deve ser aberto) $\Rightarrow$ manobra 3.
- Ramo 28-6 (deve ser aberto) $\Rightarrow$ manobra 4.
- Ramo 34-33 (deve ser aberto) $\Rightarrow$ manobra 5.
- Ramo 27-28 (deve ser fechado) $\Rightarrow$ manobra 6.
- Ramo 8-33 (deve ser fechado) $\Rightarrow$ manobra 7.

Figura 2 - Sistema de 53 barras



Fonte: (Souza, 2018).

- Ramo 35-40 (deve ser fechado) $\Rightarrow$ manobra 8.
- Ramo 28-50 (deve ser fechado) $\Rightarrow$ manobra 9.

A notação anterior evidencia que no vetor de representação de uma proposta de solução, a manobra da chave 5-4, que deve ser aberta, é referida como manobra 1. A Figura 3 ilustra uma proposta de solução para uma falta no nó 3. Essa proposta de solução contém a sequência em que as chaves devem ser operadas. É importante observar que essa representação de uma proposta de solução abrange todo o espaço de busca, ou seja, o número de propostas de solução que podem ser geradas é igual a $n!$. No caso do problema da falta no nó 3, esse valor é igual a $9! = 362.880$. Isso significa que, nesse caso, para resolver o problema de SOC por enumeração completa, existem 362.880 propostas de solução que devem ser avaliadas. Além disso, cada proposta de solução requer, a princípio, a avaliação de $n = 9$ topologias com relação às restrições

Figura 3 - Sequencia de operação de chaveamento, representação de uma proposta solução

$$x = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 6 & 5 & 7 & 8 \\ \hline \end{array}$$

Fonte: Elaboração do autor.

Figura 4 - Sequencia de operação de chaveamento, proposta solução que gera laço

$$x = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 4 & 9 & 8 & 1 & 5 & 2 & 7 & 3 & 6 \\ \hline \end{array}$$

Fonte: Elaboração do autor.

(2)–(6), totalizando 3.265.920 avaliações. No entanto, ao considerar todas as propostas de solução (força bruta), o número de avaliações é significativamente menor. Por exemplo, ao se analisar uma proposta de solução são realizadas duas verificações sequenciais:

1. **Verificar se a manobra de fechamento de chave gera um laço na parcela energizada da rede:** Caso seja gerado um laço após a manobra de fechamento de chave, a proposta de solução é descartada, e as próximas manobras de fechamento não são analisadas. Isso significa que a proposta de solução é descartada sem a necessidade de se avaliar fluxos de potência para sistemas radiais. Por exemplo, na proposta de solução mostrada na Figura 4, suponha que as manobras 4 e 9 tenham gerado topologias radiais energizadas. No entanto, ao se analisar a manobra 8 (fechar o ramo 35-40), verifica-se que essa manobra gera um laço na parcela energizada. Portanto, essa proposta de solução é descartada sem a resolução de problemas de fluxo de potência. Obviamente, operações de abertura de chave não irão gerar laços na parte energizada do sistema e, portanto, não necessitam ser verificadas.
2. **Resolver um problema de fluxo de potência para a parcela energizada da rede e verificar se a operação é factível:** Isso envolve verificar se os ramos não têm seus limites de corrente elétrica violados, se os módulos de tensão nas barras estão dentro dos limites permitidos e se as subestações operam dentro de seus limites. Se alguma violação for identificada em alguma manobra, a proposta de solução é descartada sem a necessidade de se analisar as manobras posteriores.

As propostas mencionadas anteriormente foram incorporadas ao algoritmo de BT. Finalmente, dois aspectos adicionais devem ser observados para se evitar avaliar fluxos de potência desnecessariamente:

1. A última manobra de chaveamento sempre levará a uma topologia que é factível, que é

Figura 5 - Sequencia de operação de chaveamento, proposta de solução inicial factível

$$\mathbf{x} =$$

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Fonte: Elaboração do autor.

fornecida pela solução do problema de restauração. Portanto, não é necessário avaliar um fluxo de potência para a última operação de chaveamento, e no máximo, $n - 1$ fluxos de potência devem ser analisados para uma proposta de solução. Além disso, também não é necessário avaliar se existem laços na parcela energizada da rede após a última operação de chaveamento.

2. Uma manobra de abertura de chave pode apenas reduzir a carga conectada à parcela energizada do sistema, o que reduz o carregamento da rede. Assim, a abertura de uma chave não deve levar a violações de capacidade do sistema e, portanto, não é necessário avaliar a operação da rede utilizando um fluxo de potência quando uma manobra de abertura de chave é realizada. Seja nf o número de manobras de fechamento de chaves que devem ser realizadas. Assim, no máximo nf fluxos de potência devem ser analisados para avaliar a operação de uma proposta de solução, sendo que o máximo é $nf - 1$ caso a última operação seja de fechamento de chave. Assim, no máximo 4 fluxos de potência devem ser analisados para uma proposta de solução do exemplo em questão.

3.3.2 Geração de uma proposta de solução inicial

Propostas de solução iniciais de melhor qualidade podem ser geradas utilizando informações do problema. Um aspecto importante do problema é a existência de uma solução trivial factível que pode ser escolhida como solução inicial. Essa proposta consiste em abrir inicialmente todas as chaves que devem ser abertas e depois fechar todas as chaves que devem ser fechadas. A Figura 5 ilustra essa proposta trivial factível para uma falta no nó 3.

3.3.3 Avaliação da qualidade e da factibilidade de uma proposta de solução

Uma vez conhecida uma proposta de solução do problema de SOC, representada na forma mostrada anteriormente e gerada pela meta-heurística, o próximo passo consiste em verificar a factibilidade e a qualidade dessa proposta de solução. A factibilidade deve ser analisada em duas etapas, conforme descrito a seguir:

1. **Verificação de formação de laços:** Deve-se verificar se alguma manobra de fechamento de chaves gera um laço. Se isso ocorrer, a proposta é considerada infactível e não é

necessário resolver problemas de fluxo de potência para sistemas radiais (Zimmerman; Murillo-Sanchez; Thomas, 2011). No problema de SOC, a manobra de uma chave gera uma topologia intermediária. Portanto, cada uma dessas topologias intermediárias deve ser factível topologicamente, ou seja, não deve gerar laço na parcela energizada da rede, e todas as topologias intermediárias devem operar respeitando seus limites operacionais. Nessa primeira etapa, verifica-se a ocorrência de laços ao se fechar chaves. Se algum laço aparecer em uma topologia intermediária, a proposta de solução é descartada. Assim, no máximo nf topologias intermediárias devem ser analisadas em uma proposta de solução, sendo o máximo $nf - 1$ caso a última manobra for de fechamento de chave, uma vez que sabe-se que após realizar todas as operações, a topologia da rede energizada resultante deve ser radial.

2. **Resolução de problemas de fluxo de potência para sistemas radiais:** Após verificar que uma proposta de solução não possui topologias intermediárias com laços, é necessário resolver um problema de fluxo de potência para sistemas radiais para cada manobra de fechamento de chave. Em princípio, devem ser resolvidos nf problemas de fluxo de potência para sistemas radiais. No caso da falta no nó 3 do sistema da Figura 7, seriam necessários até 4 problemas de fluxo de potência (ou até 3, ou seja, $nf - 1$, problemas de fluxo de potência, caso a última manobra fosse de fechamento de chave). No entanto, se uma topologia intermediária violar seus limites operacionais, a proposta de solução é descartada como infactível, e portanto, não é necessário resolver os problemas de fluxo de potência para as manobras de fechamento restantes da proposta de solução. Além disso, para resolver o problema de fluxo de potência, é necessário identificar previamente a parcela energizada e a parcela desenergizada. A partir da parcela desenergizada, encontra-se a demanda não atendida. Para verificar a factibilidade da proposta de solução, é necessário resolver um problema de fluxo de potência para o sistema da parcela energizada e verificar se não existem violações de limites operacionais.

Além disso, se na resolução do problema de SOC para uma falta no nó 3 for levada em conta a manobra sequencial de dois pares de chaves, o espaço de busca é significativamente reduzido. Anteriormente, mencionou-se que o espaço de busca desse problema é composto por 362.880 propostas de solução. No entanto, se for observado que a manobra 5 deve ser realizada sempre imediatamente antes da 8 e que a manobra 9 deve ser realizada sempre imediatamente antes da 6, o tamanho do espaço de busca é reduzido de $9!$ para $7! = 5.040$. Portanto, para cada par de chaves diferentes que devem ser manobradas na sequência correta, identificadas em uma fase de pré-processamento, o espaço de busca é reduzido drasticamente.

Na verificação da factibilidade, após concluir que a proposta de solução é factível (após verificar que não há topologias intermediárias com laços e que a operação de cada topologia intermediária atende os limites da rede), então a qualidade da proposta de solução é calculada

de forma trivial. Para isso, é suficiente armazenar a demanda não atendida em cada topologia intermediária, multiplicá-la pelo tempo do intervalo correspondente (tempo para se realizar a manobra) e somar os valores obtidos para encontrar a ENS para a proposta de solução.

3.3.4 Estrutura de vizinhança

A vizinhança do algoritmo de BT utilizada na etapa de busca local foi definida seguindo a seguinte proposta: O vizinho de uma solução corrente é toda proposta de solução gerada fazendo a troca simples de um par de operações de chaveamento. Para uma dada proposta de solução, isso significa avaliar $n(n-1)/2$ soluções vizinhas. No exemplo em questão, em que $n = 9$, existem 36 soluções vizinhas para cada proposta de solução.

3.3.5 Critério de parada

O critério de parada adotado consiste em parar a busca após um número máximo de operações de *restart*. Nos testes, adotou-se esse número igual a 20.

4 BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL BÁSICA PARA O SOC

4.1 Introdução

De acordo com (Mladenovic; Hansen, 1997), uma abordagem meta-heurística simples e eficaz envolve a alternância sistemática entre diferentes vizinhanças, combinada com um algoritmo de busca local. Eles introduzem essa técnica como busca em vizinhança variável (VNS, do inglês *variable neighborhood search*), apresentando um algoritmo básico denominado BVNS (*basic variable neighborhood search*). Ao contrário de muitas técnicas de busca local, a VNS não segue uma trajetória específica, mas explora vizinhanças progressivamente mais distantes da solução atual, saindo da incumbente apenas se uma melhoria for alcançada. Isso permite a preservação das características favoráveis da solução atual, como quando a maioria das variáveis já está otimizada, facilitando a obtenção de soluções vizinhas promissoras.

O algoritmo BVNS é uma técnica meta-heurística que pertence à família de métodos VNS. Ele se destaca por alternar sistematicamente entre diferentes estruturas de vizinhança na busca de uma solução ótima ou de alta qualidade para problemas de otimização combinatória. A ideia central do BVNS é evitar que o algoritmo fique preso em mínimos locais, explorando continuamente novas regiões do espaço de soluções. O método combina exploração e intensificação de forma eficiente, utilizando uma sequência de vizinhanças, onde o tamanho da vizinhança varia conforme o progresso da busca (Mladenovic; Hansen, 1997).

A estrutura do algoritmo BVNS pode ser resumida em três etapas principais: *agitação*, *busca local* e *mudança de vizinhança*. Na primeira etapa, chamada de *shaking*, o algoritmo realiza um movimento aleatório dentro de uma vizinhança de tamanho k , gerando uma nova solução inicial para a próxima fase. Essa etapa tem como objetivo escapar de mínimos locais e introduzir diversidade na busca. Em seguida, o algoritmo aplica uma *busca local* à solução obtida, geralmente utilizando uma técnica de otimização mais tradicional para encontrar um ótimo local dentro dessa vizinhança. Caso a solução encontrada seja melhor do que a atual, ela substitui a solução corrente.

O BVNS se diferencia de outras técnicas por alternar entre diferentes tamanhos de vizinhança de forma sistemática. Se, após a etapa de busca local, a nova solução não apresentar melhorias, o algoritmo incrementa o tamanho da vizinhança k , movendo-se para uma vizinhança

mais distante da solução corrente. Esse processo se repete até atingir um número máximo de vizinhanças ou um critério de parada, como tempo computacional ou número de iterações sem melhorias. Ao adotar esse procedimento, o BVNS consegue combinar eficiência de exploração com uma busca local refinada, oferecendo um bom equilíbrio entre diversificação e intensificação.

Uma das principais vantagens do BVNS é sua simplicidade e facilidade de implementação, especialmente quando comparado a outras meta-heurísticas mais complexas, como algoritmos genéticos ou algoritmos de enxame de partículas. Além disso, o BVNS tem uma forte adaptabilidade a diferentes problemas de otimização. A escolha das vizinhanças pode ser ajustada de acordo com as características específicas do problema, tornando o algoritmo flexível para uma ampla gama de aplicações, desde problemas da área de pesquisa operacional até problemas de otimização de sistemas de energia elétrica.

Outro aspecto importante do BVNS é sua robustez em relação aos parâmetros. Diferente de outras meta-heurísticas que exigem uma calibração fina de parâmetros (como a probabilidade de cruzamento em algoritmos genéticos), o BVNS depende menos de parâmetros ajustáveis. O número máximo de vizinhanças k e o tipo de vizinhança são os principais parâmetros a serem definidos, mas o desempenho do algoritmo costuma ser estável em uma faixa ampla desses valores. Isso facilita a aplicação do BVNS em problemas práticos, sem a necessidade de longos processos de ajuste paramétrico.

Em termos de complexidade computacional, o BVNS oferece uma boa relação custo-benefício. A busca local é aplicada de maneira eficiente dentro de cada vizinhança, enquanto o procedimento de agitação permite explorar novas regiões sem que o custo computacional cresça de forma exponencial. Embora a quantidade de vizinhanças exploradas possa aumentar com o tamanho do problema, a natureza iterativa e o controle de vizinhanças do BVNS tornam o método escalável para problemas de grande dimensão. Em casos onde a busca local é particularmente custosa, estratégias híbridas podem ser adotadas, combinando o BVNS com outras técnicas para melhorar o desempenho.

Além da versão básica do VNS (BVNS), outras variações da busca em vizinhança variável podem ser empregadas em cenários específicos. Entre essas variações, o VNS generalizado (GVNS) e o VNS adaptativo introduzem mecanismos adicionais, como o ajuste dinâmico do tamanho das vizinhanças e o uso de estratégias diferentes de agitação para ampliar a diversidade da busca. Essas variações são aplicadas, por exemplo, em problemas de otimização multiobjetivo ou em problemas onde o espaço de busca é altamente irregular. No entanto, o BVNS permanece como uma versão robusta e eficaz para uma ampla gama de aplicações.

Na literatura, o BVNS tem mostrado resultados competitivos em uma série de problemas, incluindo otimização de sistemas de energia elétrica, alocação de facilidades e problemas de corte de estoque. Estudos comparativos frequentemente demonstram que o BVNS alcança so-

luções de alta qualidade com menor tempo computacional quando comparado a outras meta-heurísticas, especialmente em problemas de grande porte. Esses resultados fazem do BVNS uma escolha atrativa tanto para aplicações acadêmicas quanto industriais.

4.2 Busca em vizinhança variável básica

Defina N_k , $k = 1, \dots, k_{\max}$, como um conjunto finito de estruturas de vizinhanças pré-determinadas, e $N_k(\mathbf{x})$ como o conjunto de soluções da k -ésima vizinhança de $\mathbf{x}$. Habitualmente, heurísticas de busca local empregam apenas uma estrutura de vizinhança, ou seja, $k_{\max} = 1$. Contudo, ao se utilizar múltiplas estruturas de vizinhança, algumas questões surgem:

1. Qual N_k deve ser selecionado e quantas estruturas devem ser empregadas?
2. Qual a ordem ideal das estruturas de vizinhança durante a busca?
3. Que estratégia adotar para as mudanças entre vizinhanças?

Figura 6 - Algoritmo BVNS

Inicialização: Escolha o conjunto de estruturas de vizinhança N_k , $k = 1, \dots, k_{\max}$; determine uma solução inicial $\mathbf{x}$; estabeleça um critério de parada;

Repita os seguintes passos até que o critério de parada seja alcançado:

1. Defina $k \leftarrow 1$;
2. **Repita** os seguintes passos até $k = k_{\max}$:
 - (a) **Agitação:** Gere uma solução aleatória $\mathbf{x}'$ da k -ésima vizinhança de $\mathbf{x}$ ($\mathbf{x}' \in N_k(\mathbf{x})$);
 - (b) **Busca local:** Aplique um método de busca local com $\mathbf{x}'$ como solução inicial; denote por $\mathbf{x}''$ o melhor ótimo local obtido por esta busca;
 - (c) **Mover ou não:** Se o ótimo local $\mathbf{x}''$ é melhor que a incumbente $\mathbf{x}$, mova para lá ($\mathbf{x} \leftarrow \mathbf{x}''$) e continue a busca em N_1 ($k \leftarrow 1$); caso contrário, faça $k \leftarrow k + 1$.

Fonte: (Mladenovic; Hansen, 1997).

Os autores (Mladenovic; Hansen, 1997) propuseram respostas a essas perguntas por meio do algoritmo BVNS, delineado na Figura 6. Conforme o procedimento exposto nesta figura, primeiramente, seleciona-se um conjunto de estruturas que definem as vizinhanças em torno de $\mathbf{x} \in X$. Então, uma solução inicial $\mathbf{x}$ é determinada, podendo ser refinada por uma busca local. Seleciona-se aleatoriamente um ponto $\mathbf{x}'$ na primeira vizinhança, $N_1(\mathbf{x})$, e é executada uma busca descendente a partir de $\mathbf{x}'$ utilizando a busca local. Isso resulta em um novo ótimo local $\mathbf{x}''$. Três cenários podem ocorrer: (i) $\mathbf{x}'' = \mathbf{x}$, indicando que $\mathbf{x}$ já é um ótimo local dentro

da vizinhança, então o processo continua na próxima estrutura de vizinhança, $N_k(\mathbf{x})$, $k \geq 2$; (ii) $\mathbf{x}'' \neq \mathbf{x}$ e $v(\mathbf{x}'') \geq v(\mathbf{x})$, ou seja, outro ótimo local foi encontrado, mas que não supera a melhor solução anterior (ou incumbente), então o processo avança para a próxima estrutura de vizinhança; (iii) $\mathbf{x}'' \neq \mathbf{x}$ e $v(\mathbf{x}'') < v(\mathbf{x})$, indicando a descoberta de um ótimo local melhor que a incumbente; nesse caso, a busca é reorientada para $\mathbf{x}''$, reiniciando com a primeira vizinhança. Se a última vizinhança for explorada sem encontrar uma solução melhor que a incumbente, a busca é reinicializada na primeira estrutura de vizinhança, $N_1(\mathbf{x})$, repetindo-se esse processo até que o critério de parada seja atingido. O critério de parada do BVNS pode incluir, por exemplo, um número máximo de iterações, tempo de processamento limite ou um número máximo de iterações sem melhoria.

4.3 Algoritmo de busca em vizinhança variável proposto para o problema de SOC

Os detalhes de implementação do algoritmo BVNS são basicamente os mesmos utilizados no algoritmo de BT apresentados na Seção 3.3. Assim, a representação de uma proposta de solução, geração de uma proposta de solução inicial, avaliação da qualidade e da factibilidade de uma proposta de solução, estrutura de vizinhança e critério de parada são os mesmos.

Na etapa de agitação foram consideradas cinco vizinhanças, que consistem em trocar a ordem de k operações de chaveamento na vizinhança k .

4.3.1 Critério de parada

O critério de parada adotado consiste em parar a busca após um número máximo de iterações sem melhoria da função objetivo da solução incumbente. Nos testes, adotou-se esse número igual a 20.

5 TESTES E RESULTADOS

5.1 Dados do sistema

Os algoritmos propostos de BT e BVNS para resolver o problema de SOC para RSDEE foram implementado em MATLAB versão R2024b e os testes foram realizados em um computador com processador AMD Ryzen™ 9 5950X de 3.4 GHz e com 32 GB de RAM.

O sistema testado é o de 53 barras ilustrado na Figura 7. Dados completos para esse sistema podem ser encontrados em (Souza, 2018). Os limites mínimo e máximo de tensão nas barras são 0,95 p.u. e 1,00 p.u., respectivamente. Para os testes são considerados seis cenários distintos de faltas simples, nas barras 1, 3, 4, 11, 14 e 45. Considera-se que todas as chaves são operadas localmente e o tempo de operação de cada chave é de 20 minutos.

Os resultados do problema de restauração, sem a sequência de operações de chaveamento, são encontrados em (Souza, 2018).

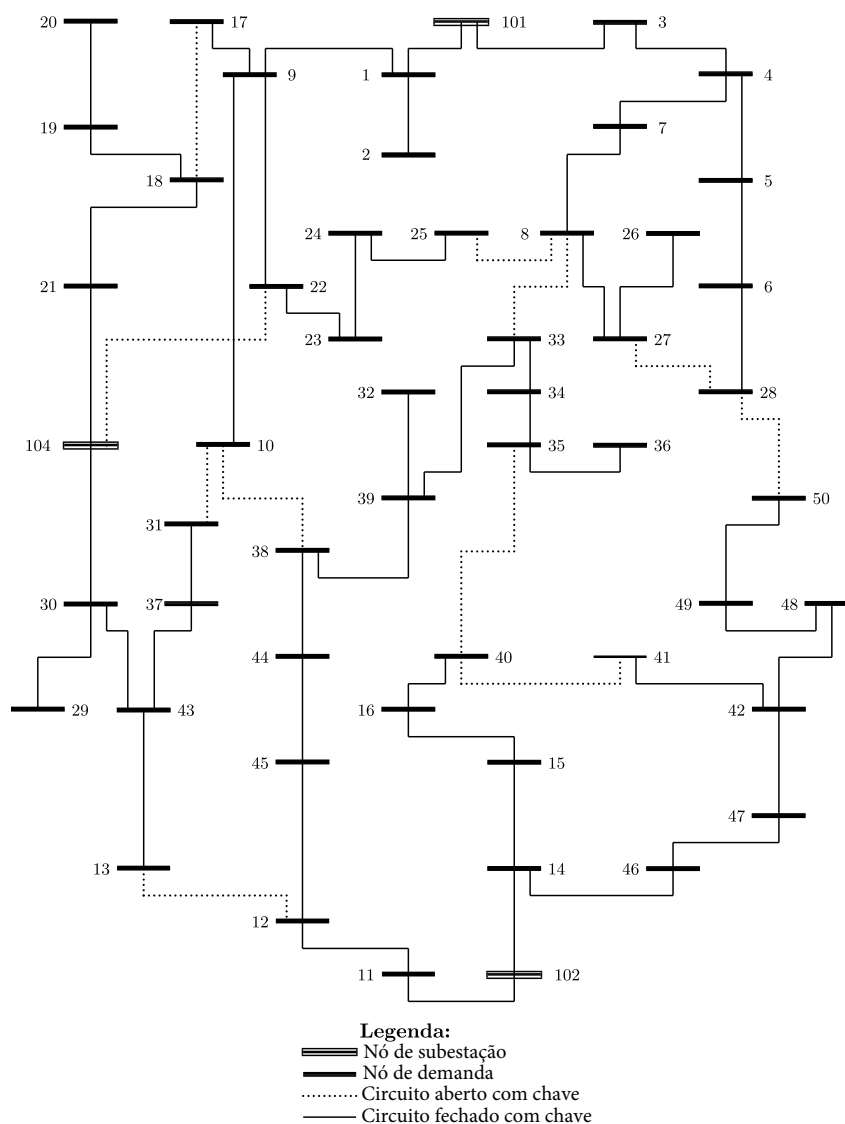
As colunas das tabelas deste capítulo estão abreviadas apresentando o significado:

- **SEQ**: Sequência de operação das chaves;
- **ENS (kWh)**: Energia não suprida;
- **IT**: Número de iterações para o algoritmo encontrar a melhor solução;
- **APS**: Número de avaliações de propostas solução para o algoritmo encontrar a melhor solução;
- **CFP**: Número de cálculos de fluxo de potência para o algoritmo encontrar a melhor solução.

5.2 Falta na barra 1

Ao examinar os resultados do problema de RSDEE, identifica-se que oito barras do sistema (barras 2, 9, 10, 17, 22, 23, 24 e 25) são desconectadas após uma falta na barra 1, além da própria barra 1. Isso indica as áreas afetadas pela interrupção, onde não há fornecimento de

Figura 7 - Sistema de 53 barras



Fonte: (Souza, 2018).

energia elétrica. Os ramos 101-1, 9-1 e 2-1 (conectados à barra 1) são abertos para isolar a falta e ficam indisponíveis para operação. Essa desconexão é uma etapa importante para isolar e lidar com as áreas afetadas antes de iniciar a restauração.

Um dado significativo é a carga não atendida, que totaliza 6.791,40 kW, com exceção da carga da barra 1. Esse valor representa a demanda de energia que não está sendo suprida devido à interrupção. Essa carga não atendida tem um impacto direto nos consumidores, que enfrentam a falta de energia e podem sofrer com os transtornos decorrentes dessa situação.

A solução do problema de RSDEE indica que três chaves devem ser operadas: deve-se abrir a chave do circuito 25-24 (operação 1) e fechar as chaves dos circuitos 104-22 (operação 2) e 8-25 (operação 3). Note que a ordem de operação não é considerada aqui. Realizando-se as operações nessa sequência inicial, ou seja, 1, 2 e 3 fornece uma solução inicial factível com um

valor de ENS igual a 5.082,00 kWh.

Aplicando-se os algoritmo de BT e BVNS propostos, verifica-se que a sequência de operação das chaves inicial 1, 2 e 3, com um valor de ENS igual a 5.082,00 kWh, é a ótima. Essa medida representa a quantidade de energia que não foi entregue aos consumidores durante a interrupção. Este caso, por envolver poucas operações de chaveamento (note que o número de sequências possíveis é apenas seis), não possui uma sequência factível alternativa e, portanto, não apresenta muito interesse para este trabalho, diferentemente dos casos das seções seguintes.

5.3 Falta na barra 3

Ao examinar os resultados do problema de RSDEE, identifica-se que oito barras do sistema (barras 4, 5, 6, 7, 8, 26, 27 e 28) são desconectadas após uma falta na barra 3, além da própria barra 3. Os ramos 101-3 e 4-3 (conectados à barra 3) são abertos para isolar a falta e ficam indisponíveis para operação. A carga não atendida totaliza 7.415,10 kW, com exceção da carga da barra 3.

A solução do problema de RSDEE indica que nove chaves devem ser operadas: abrir 5-4 (operação 1), abrir 27-8 (operação 2), abrir 26-27 (operação 3), abrir 28-6 (operação 4), abrir 34-33 (operação 5), fechar 28-27 (operação 6), fechar 8-33 (operação 7), fechar 35-40 (operação 8) e fechar 28-50 (operação 9). Isso demonstra a complexidade das ações necessárias para restabelecer o fornecimento de energia. Note que, novamente a ordem de operação não é considerada aqui. Realizando-se as operações nessa sequência inicial, ou seja, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9, fornece uma solução inicial factível com um valor de ENS igual a 22.060,50 kWh.

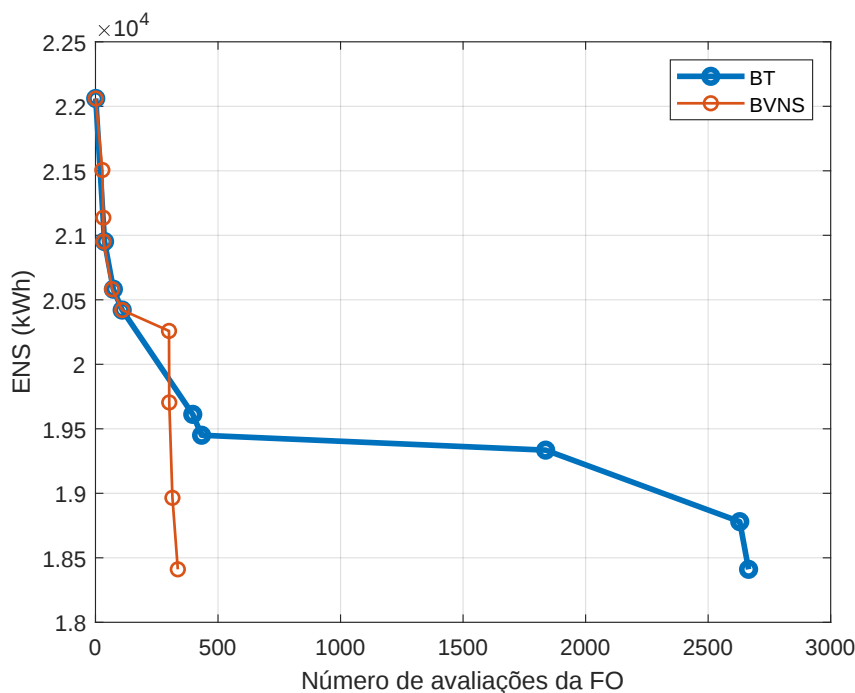
Os algoritmos de BT e BVNS fornecem a seguinte sequência de operação das chaves: 1, 2, 5, 7, 8, 4, 9, 3 e 6. Para essa sequência de operações de chaveamento o valor da ENS é de 18.410,70 kWh.

O algoritmo de BT encontra a solução do problema na iteração 52, após a avaliação de 1837 propostas de solução que demandam o cálculo de 3727 fluxos de potência. O tempo computacional para encontrar essa solução foi de 5,70 s. Adicionalmente, o algoritmo para após 84 iterações, após avaliar 2989 propostas de solução que demandam o cálculo de 6108 fluxos de potência, com um tempo computacional de 9,20 s. Finalmente, o tamanho final da lista tabu é 84.

O algoritmo BVNS encontra a solução do problema na iteração 3, após a avaliação de 336 propostas de solução que demandam o cálculo de 638 fluxos de potência. O tempo computacional para encontrar essa solução foi de 0,96 s. Adicionalmente, o algoritmo para após 23 iterações, após avaliar 2435 propostas de solução que demandam o cálculo de 4285 fluxos de potência, com um tempo computacional de 6,47 s.

Note que esse é um caso de complexidade alta, em que o espaço de soluções possui 362.880 soluções candidatas. O algoritmo BVNS foi capaz de encontrar a solução ótima após analisar em torno de 0,09% do espaço de soluções.

Figura 8 - Comparação da evolução da incumbente para os algoritmos de BT e BVNS para falta na barra 3



Fonte: Elaboração do autor.

A Figura 8 e a Tabela 1 ilustram a evolução da incumbente para os algoritmos de BT e BVNS para falta na barra 3.

Tabela 1 - Simulação de falta na barra 3

	SEQ	ENS (kWh)	IT	APS	CFP
Inicial	1 2 3 4 5 6 7 8 9	22.060,50			
BT	1 2 5 7 8 4 9 6 3	18.410,70	52	1837	3727
BVNS	1 2 5 7 8 4 9 6 3	18.410,70	3	336	638

Fonte: Elaboração do Autor.

5.4 Falta na barra 4

Ao examinar os resultados do problema de RSDEE, identifica-se que sete barras do sistema (barras 5, 6, 7, 8, 26, 27 e 28) são desconectadas após uma falta na barra 4, além da própria barra 4. Os ramos 4-3, 7-4 e 5-4 (conectados à barra 4) são abertos para isolar a falta e ficam indisponíveis para operação. A carga não atendida totaliza 6.652,80 kW, com exceção da carga da barra 4.

A solução do problema de RSDEE indica que seis chaves devem ser operadas: abrir 6-5 (operação 1), abrir 26-27 (operação 2), abrir 34-33 (operação 3), fechar 8-33 (operação 4), fechar 35-40 (operação 5) e fechar 28-50 (operação 6). A ordem de operação não é considerada aqui. Realizando-se as operações nessa sequência inicial, ou seja, 1, 2, 3, 4, 5 e 6, fornece uma solução inicial factível com um valor de ENS igual a 12.381,60 kWh.

Os algoritmos de BT e BVNS fornecem a seguinte sequência de operação das chaves: 2, 3, 4, 5, 1 e 6. Para essa sequência de operações de chaveamento o valor da ENS é de 11.365,20 kWh.

O algoritmo de BT encontra a solução do problema na iteração 11, após a avaliação de 151 propostas de solução que demandam o cálculo de 201 fluxos de potência. O tempo computacional para encontrar essa solução foi de 0,31 s. Adicionalmente, o algoritmo para após 155 iterações, após avaliar 2311 propostas de solução que demandam o cálculo de 2859 fluxos de potência, com um tempo computacional de 4,36 s. Finalmente, o tamanho final da lista tabu é 155.

O algoritmo BVNS encontra a solução do problema na iteração 6, após a avaliação de 226 propostas de solução que demandam o cálculo de 271 fluxos de potência. O tempo computacional para encontrar essa solução foi de 0,44 s. Adicionalmente, o algoritmo para após 26 iterações, após avaliar 1181 propostas de solução que demandam o cálculo de 1475 fluxos de potência, com um tempo computacional de 2,35 s.

Note que esse é um caso de complexidade média, em que o espaço de soluções possui 720 soluções candidatas. O algoritmo BVNS foi capaz de encontrar a solução ótima após analisar em torno de 31,39% do espaço de soluções.

A Figura 9 e Tabela 2 ilustram a evolução da incumbente para os algoritmos de BT e BVNS para falta na barra 4.

Tabela 2 - Simulação de falta na barra 4

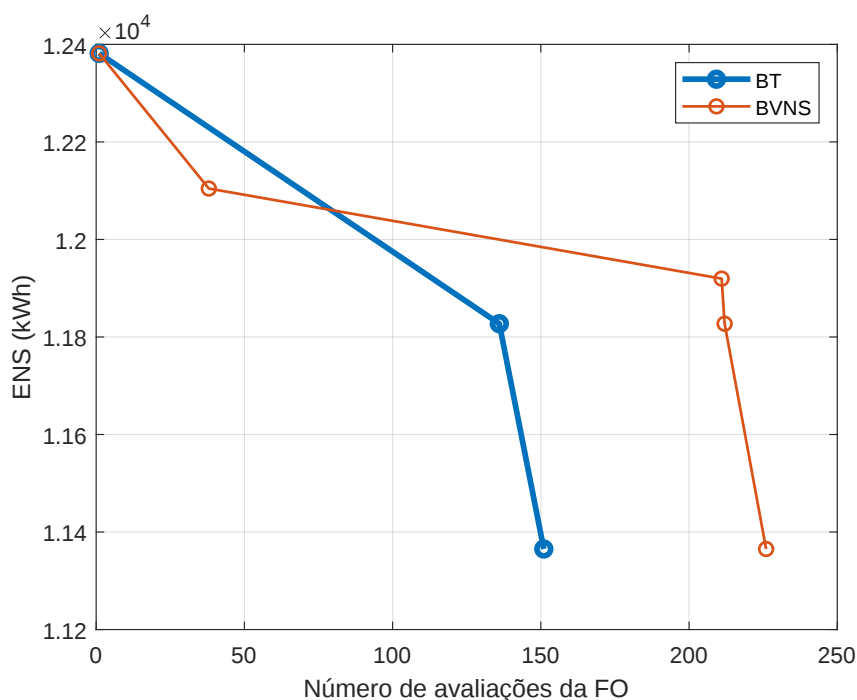
	SEQ	ENS (kWh)	IT	APS	CFP
Inicial	1 2 3 4 5 6	12.381,60			
BT	2 3 4 5 1 6	11.365,20	11	151	201
BVNS	2 3 4 5 1 6	11.365,20	6	226	271

Fonte: Elaboração do Autor.

5.5 Falta na barra 11

Ao examinar os resultados do problema de RSDEE, identifica-se que dez barras do sistema (barras 12, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 44 e 45) são desconectadas após uma falta na barra 11, além da própria barra 11. Os ramos 102-11 e 12-11 (conectados à barra 11) são abertos para

Figura 9 - Comparação da evolução da incumbente para os algoritmos de BT e BVNS para falta na barra 4



Fonte: Elaboração do autor.

isolar a falta e ficam indisponíveis para operação. A carga não atendida totaliza 9.078,30 kW, com exceção da carga da barra 11.

A solução do problema de RSDEE indica que sete chaves devem ser operadas: abrir 45-12 (operação 1), abrir 39-38 (operação 2), abrir 34-35 (operação 3), fechar 13-12 (operação 4), fechar 8-33 (operação 5), fechar 35-40 (operação 6) e fechar 10-38 (operação 7). A ordem de operação não é considerada aqui. Realizando-se as operações nessa sequência inicial, ou seja, 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, fornece uma solução inicial factível com um valor de ENS igual a 16.516,50 kWh.

Os algoritmos de BT e BVNS fornecem a seguinte sequência de operação das chaves: 3, 2, 5, 1, 7, 4 e 6. Para essa sequência de operações de chaveamento o valor da ENS é de 12.959,10 kWh.

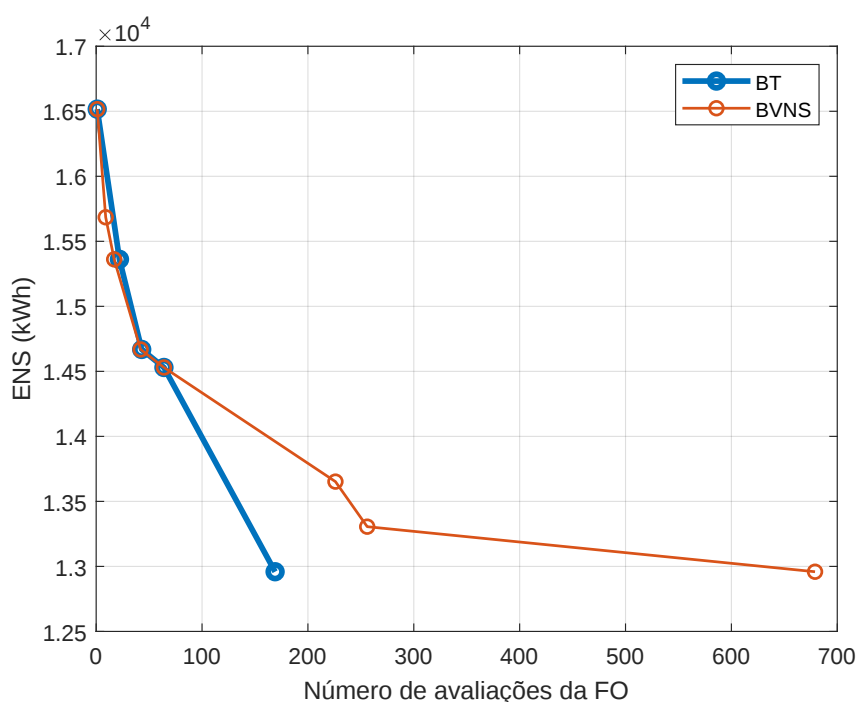
O algoritmo de BT encontra a solução do problema na iteração 9, após a avaliação de 169 propostas de solução que demandam o cálculo de 344 fluxos de potência. O tempo computacional para encontrar essa solução foi de 0,51 s. Adicionalmente, o algoritmo para após 164 iterações, após avaliar 3424 propostas de solução que demandam o cálculo de 6203 fluxos de potência, com um tempo computacional de 8,98 s. Finalmente, o tamanho final da lista tabu é 164.

O algoritmo BVNS encontra a solução do problema na iteração 9, após a avaliação de 679

propostas de solução que demandam o cálculo de 1155 fluxos de potência. O tempo computacional para encontrar essa solução foi de 1,67 s. Adicionalmente, o algoritmo para após 29 iterações, após avaliar 2108 propostas de solução que demandam o cálculo de 3418 fluxos de potência, com um tempo computacional de 4,93 s.

Note que esse é um caso de complexidade média, em que o espaço de soluções possui 5040 soluções candidatas. O algoritmo BVNS foi capaz de encontrar a solução ótima após analisar em torno de 13,47% do espaço de soluções.

Figura 10 - Comparação da evolução da incumbente para os algoritmos de BT e BVNS para falta na barra 11



Fonte: Elaboração do autor.

A Figura 10 e a Tabela 3 ilustram a evolução da incumbente para os algoritmos de BT e BVNS para falta na barra 11.

Tabela 3 - Simulação de falta na barra 11

	SEQ	ENS (kWh)	IT	APS	CFP
Inicial	1 2 3 4 5 6 7	16.516,50			
BT	3 2 5 1 7 4 6	12.959,10	9	169	344
BVNS	3 2 5 1 7 4 6	12.959,10	9	679	1155

Fonte: Elaboração do Autor.

5.6 Falta na barra 14

Ao examinar os resultados do problema de RSDEE, identifica-se que dez barras do sistema (barras 15, 16, 40, 41, 42, 46, 47, 48, 49 e 50) são desconectadas após uma falta na barra 14, além da própria barra 14. Os ramos 102-14, 15-14 e 14-46 (conectados à barra 14) são abertos para isolar a falta e ficam indisponíveis para operação. A carga não atendida totaliza 8.108,10 kW, com exceção da carga da barra 14.

A solução do problema de RSDEE indica que sete chaves devem ser operadas: abrir 36-35 (operação 1), abrir 16-40 (operação 2), abrir 42-41 (operação 3), abrir 47-42 (operação 4), fechar 40-41 (operação 5), fechar 35-40 (operação 6) e fechar 28-50 (operação 7). A ordem de operação não é considerada aqui. Realizando-se as operações nessa sequência inicial, ou seja, 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, fornece uma solução inicial factível com um valor de ENS igual a 18.803,40 kWh.

Os algoritmos de BT e BVNS fornecem a seguinte sequência de operação das chaves: 4, 3, 7, 2, 6, 1 e 5. Para essa sequência de operações de chaveamento o valor da ENS é de 15.292,20 kWh.

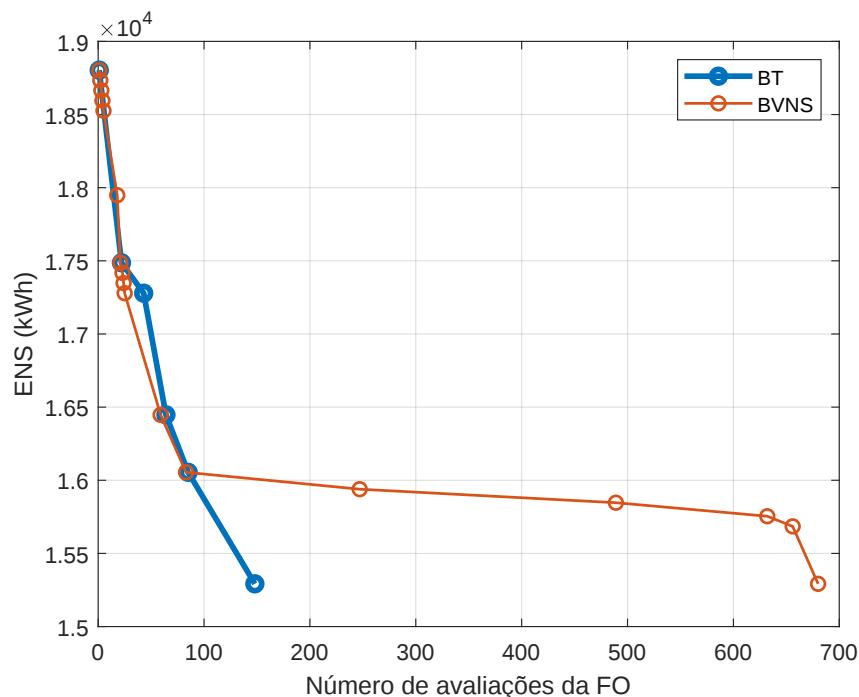
O algoritmo de BT encontra a solução do problema na iteração 8, após a avaliação de 148 propostas de solução que demandam o cálculo de 264 fluxos de potência. O tempo computacional para encontrar essa solução foi de 0,41 s. Adicionalmente, o algoritmo para após 188 iterações, após avaliar 3928 propostas de solução que demandam o cálculo de 6683 fluxos de potência, com um tempo computacional de 9,74 s. Finalmente, o tamanho final da lista tabu é 188.

O algoritmo BVNS encontra a solução do problema na iteração 10, após a avaliação de 680 propostas de solução que demandam o cálculo de 1140 fluxos de potência. O tempo computacional para encontrar essa solução foi de 1,70 s. Adicionalmente, o algoritmo para após 30 iterações, após avaliar 2361 propostas de solução que demandam o cálculo de 3875 fluxos de potência, com um tempo computacional de 5,68 s.

Note que esse é um caso de complexidade média, em que o espaço de soluções possui 5040 soluções candidatas. O algoritmo BVNS foi capaz de encontrar a solução ótima após analisar em torno de 13,49% do espaço de soluções.

A Figura 11 e a Tabela 4 ilustram a evolução da incumbente para os algoritmos de BT e BVNS para falta na barra 14.

Figura 11 - Comparação da evolução da incumbente para os algoritmos de BT e BVNS para falta na barra 14



Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 4 - Simulação de falta na barra 14

	SEQ	ENS (kWh)	IT	APS	CFP
Inicial	1 2 3 4 5 6 7	18.803,40			
BT	4 3 7 2 6 1 5	15.292,20	8	148	264
BVNS	4 3 7 2 6 1 5	15.292,20	10	680	1140

Fonte: Elaboração do Autor.

5.7 Falta na barra 45

Ao examinar os resultados do problema de RSDEE, identifica-se que oito barras do sistema (barras 32, 33, 34, 35, 36, 38, 39 e 44) são desconectadas após uma falta na barra 45, além da própria barra 45. Os ramos 45-12 e 44-45 (conectados à barra 45) são abertos para isolar a falta e ficam indisponíveis para operação. A carga não atendida totaliza 7.276,50 kW, com exceção da carga da barra 45.

A solução do problema de RSDEE indica que cinco chaves devem ser operadas: abrir 39-38 (operação 1), abrir 33-34 (operação 2), fechar 8-33 (operação 3), fechar 35-40 (operação 4) e fechar 10-38 (operação 5). A ordem de operação não é considerada aqui. Realizando-se as operações nessa sequência inicial, ou seja, 1, 2, 3, 4 e 5, fornece uma solução inicial factível com um valor de ENS igual a 8.985,90 kWh.

Os algoritmos de BT e BVNS fornecem a seguinte sequência de operação das chaves: 1, 2,

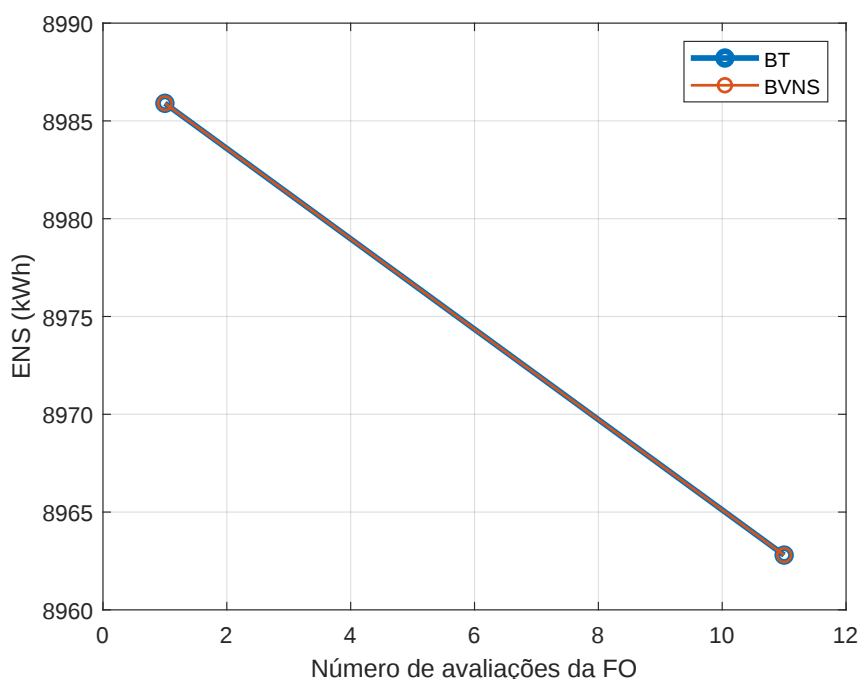
3, 5 e 4. Para essa sequência de operações de chaveamento o valor da ENS é de 8.962,80 kWh.

O algoritmo de BT encontra a solução do problema na iteração 2, após a avaliação de 11 propostas de solução que demandam o cálculo de 17 fluxos de potência. O tempo computacional para encontrar essa solução foi de 0,03 s. Adicionalmente, o algoritmo para após 119 iterações, após avaliar 1181 propostas de solução que demandam o cálculo de 1516 fluxos de potência, com um tempo computacional de 2,23 s. Finalmente, o tamanho final da lista tabu é 119.

O algoritmo BVNS encontra a solução do problema na iteração 1, após a avaliação de 11 propostas de solução que demandam o cálculo de 17 fluxos de potência. O tempo computacional para encontrar essa solução foi de 0,03 s. Adicionalmente, o algoritmo para após 21 iterações, após avaliar 521 propostas de solução que demandam o cálculo de 721 fluxos de potência, com um tempo computacional de 1,09 s.

Note que esse é um caso de complexidade baixa, em que o espaço de soluções possui 120 soluções candidatas. O algoritmo BVNS foi capaz de encontrar a solução ótima após analisar em torno de 9,17% do espaço de soluções.

Figura 12 - Comparação da evolução da incumbente para os algoritmos de BT e BVNS para falta na barra 45



Fonte: Elaboração do autor.

A Figura 12 e a Tabela 5 ilustra a evolução da incumbente para os algoritmos de BT e BVNS para falta na barra 45.

Tabela 5 - Simulação de falta na barra 45

	SEQ	ENS (kWh)	IT	APS	CFP
Inicial	1 2 3 4 5	8.985,90			
BT	1 2 3 5 4	8.962,80	2	11	17
BVNS	1 2 3 5 4	8.962,80	1	11	17

Fonte: Elaboração do Autor

5.8 Discussão dos resultados

Os resultados obtidos com a aplicação dos algoritmos de BT e BVNS para o SOC na RS-DEE mostram a eficácia dessas abordagens na redução da ENS e na otimização do processo de restabelecimento do fornecimento. Nos cenários analisados, as soluções apresentadas demonstram que ambos os métodos são capazes de identificar rapidamente sequências de operações de chaveamento que minimizam a ENS, garantindo maior resiliência do sistema e reduzindo o tempo de interrupção para os consumidores. Em casos de alta complexidade, como na falta na barra 3, o algoritmo BVNS foi particularmente eficiente, encontrando as soluções ótimas após analisar uma pequena fração do espaço de soluções candidatas, enquanto o algoritmo BT, apesar de demandar mais iterações, também obteve soluções satisfatórias em termos de ENS.

Além disso, a análise dos diferentes cenários evidencia a capacidade dos algoritmos de lidarem com sistemas de variados níveis de complexidade, desde cenários mais simples, como a falta na barra 45, até casos mais complexos com maior número de operações envolvidas, como nas faltas nas barras 3 e 14. O desempenho computacional foi um fator essencial, com o algoritmo BVNS apresentando melhores tempos de convergência em todos os casos. Isso ressalta a importância de métodos robustos e eficientes para a operação de redes elétricas, onde o tempo de restauração e a quantidade de ENS são indicadores críticos de qualidade do fornecimento. Dessa forma, os resultados mostram o potencial desses algoritmos para auxiliar na automação e no gerenciamento otimizado de redes elétricas inteligentes.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho abordou o problema de sequenciamento de operações de chaveamento (SOC) na restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica (RSDEE), que envolve reestabelecer a operação da rede após uma interrupção no fornecimento de energia. O objetivo principal foi desenvolver as meta-heurísticas do tipo BT e BVNS especializadas para determinar a sequência ótima de operações de chaveamento na RSDEE, levando em consideração as topologias inicial e final conhecidas da rede.

A abordagem proposta tratou o problema de SOC como um problema de sequenciamento ótimo de tarefas, com o intuito de minimizar o custo da energia não suprida (ENS) durante o estado restaurativo da rede. Além disso, foi incorporada uma estratégia para redução do número de cálculos de fluxos de potência na avaliação de uma proposta de solução, visando melhorar a eficiência do algoritmo.

Os resultados obtidos para diversos cenários de falta no sistema de distribuição de 53 barras demonstraram a eficácia das abordagens propostas, uma vez que as mesmas sequências de operações de chaveamento foram encontradas por ambos os algoritmos de BT e de BVNS. Com relação à eficiência, o algoritmo BVNS foi capaz de resolver todas as instâncias com um menor número de avaliações de propostas de solução, o que gerou menores números de cálculos de fluxos de potência e menores tempos computacionais que o algoritmo de BT. As meta-heurísticas desenvolvidas foram capazes de determinar sequências factíveis de restauração, resultando em uma redução significativa no custo da ENS. Isso significa que as propostas apresentadas neste trabalho contribuem para minimizar o tempo de indisponibilidade e maximizar a qualidade do serviço prestado durante a RSDEE.

Em suma, as meta-heurísticas do tipo BT e BVNS especializadas mostraram-se como uma abordagem efetiva para resolver o problema de SOC na RSDEE. Os resultados obtidos destacam a relevância dessa pesquisa para o aprimoramento das técnicas de restauração de redes elétricas, beneficiando tanto as concessionárias de energia quanto os consumidores finais.

Trabalhos futuros devem apresentar melhorias na implementação dos algoritmos propostos e testes em sistemas de maior porte. Além disso, pode-se explorar diferentes cenários e considerar outros aspectos relevantes, como restrições operacionais adicionais e variações nas condições de carga, para aprimorar ainda mais a abordagem proposta.

REFERÊNCIAS

- ALVES, B. P.; MACEDO, L. H.; ROMERO, R. Busca tabu reformulada para resolver o problema de reconfiguração e alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica. In: *Anais do LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. Limeira: [s.n.], 2019. p. 1–12.
- AMASIFEN, J. C. C.; ROMERO, R.; MANTOVANI, J. R. S. Algoritmos evolutivos dedicados à reconfiguração de redes radiais de distribuição sob demandas fixas e variáveis: estudo dos operadores genéticos e parâmetros de controle. *SBA: Controle & Automação*, Campinas, v. 16, n. 3, p. 303–317, set. 2005.
- ARIF, A.; CUI, B.; WANG, Z. Switching device-cognizant sequential distribution system restoration. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 37, n. 1, p. 317–329, jan. 2021.
- BADRAN, O.; MEKHILEF, S.; MOKHLIS, H.; DAHALAN, W. Optimal switching sequence path for distribution network reconfiguration considering different types of distributed generation. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Hoboken, v. 12, n. 6, p. 874–882, jul. 2017.
- BORTOLOCI, A.; MACEDO, L. H.; ROMERO, R. Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais usando o algoritmo modificado de Merlin-Back. In: *Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Automática*. Fortaleza: [s.n.], 2022. p. 1–7.
- CARRION, C. E. C.; FARIA, W. R.; MACEDO, L. H.; ROMERO, R.; PEREIRA, B. R. Dynamic service restoration of distribution networks with volt-var devices, distributed energy resources, and energy storage systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Piscataway, v. 15, n. 2, p. 903–919, abr. 2024.
- CHEN, B.; CHEN, C.; WANG, J.; BUTLER-PURRY, K. L. Multi-time step service restoration for advanced distribution systems and microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Piscataway, v. 9, n. 6, p. 6793–6805, nov. 2017.
- DUKOVSKA, I.; MORREN, J.; SLOOTWEG, H. J. Switching sequence optimization for service restoration in distribution networks. In: IEEE. *2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*. The Hague, 2020. p. 6–10.
- FEITEIRA, I. F.; MACEDO, L. H.; ROMERO, R. Meta-heurística GRASP especializada para a reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica. In: *Anais do XXII Congresso Brasileiro de Automática*. João Pessoa: [s.n.], 2018. v. 1, n. 1, p. 1–6.
- FLORES, M.; MACEDO, L. H.; ROMERO, R. Alternative mathematical models for the optimal transmission switching problem. *IEEE Systems Journal*, Piscataway, v. 15, n. 1, p. 1245–1255, mar. 2021.

- GLOVER, F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & operations research*, Elsevier, London, v. 13, n. 5, p. 533–549, 1986.
- GLOVER, F. Tabu search: A tutorial. *Interfaces*, Paris, v. 20, n. 4, p. 74–94, jul.-ago. 1990.
- GLOVER, F. Tabu search and adaptive memory programming—advances, applications and challenges. *Interfaces in computer science and operations research: Advances in metaheuristics, optimization, and stochastic modeling technologies*, Springer, London, p. 1–75, 1997.
- GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. *Handbook of Metaheuristics*. Dordrecht: Springer US, 2003. (International Series in Operations Research & Management Science).
- GLOVER, F.; LAGUNA, M. *Tabu Search*. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1997.
- GOLDBARG, E.; GOLDBARG, M.; LUNA, H. *Otimização combinatória e metaheurísticas: algoritmos e aplicações*. São Paulo: Elsevier Brasil, 2017.
- HOME-ORTIZ, J. M.; MACEDO, L. H.; MANTOVANI, J. R. S.; ROMERO, R.; VARGAS, R.; CATALÃO, J. P. S. Optimal operation of active distribution systems with voltage control and closed-loop topology. In: *2021 IEEE Madrid PowerTech*. Madrid: [s.n.], 2021. v. 3, p. 1–6.
- HOME-ORTIZ, J. M.; MACEDO, L. H.; VARGAS, R.; ROMERO, R.; MANTOVANI, J. R. S.; CATALÃO, J. P. S. Increasing the RES hosting capacity in distribution systems through reconfiguration with closed-loop operation and voltage control. In: *2021 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*. Vaasa: IEEE, 2021. p. 1–6.
- HOME-ORTIZ, J. M.; MACEDO, L. H.; VARGAS, R.; ROMERO, R.; MANTOVANI, J. R. S.; CATALÃO, J. P. S. Increasing RES hosting capacity in distribution networks through closed-loop reconfiguration and volt/var control. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Piscataway, v. 58, n. 4, p. 4424–4435, jul. 2022.
- HOME-ORTIZ, J. M.; VARGAS, R.; MACEDO, L. H.; ROMERO, R. Joint reconfiguration of feeders and allocation of capacitor banks in radial distribution systems considering voltage-dependent models. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, London, v. 107, p. 298–310, maio 2019.
- JUMA, S.; MURIITHI, C. M.; NGOO, L. Optimal switching sequence using a metaheuristic algorithm for feeder reconfiguration. *International Journal of Engineering Research and Technology*, New Delhi, v. 11, n. 8, 2018.
- LÓPEZ, J. C.; FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; ROMERO, R. Optimal restoration/maintenance switching sequence of unbalanced three-phase distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Piscataway, v. 9, n. 6, p. 6058–6068, nov. 2017.
- LÓPEZ, J. C.; TERADA, L. Z.; RIDER, M. J.; WU, Q. Design and simulation of a centralized self-healing scheme for unbalanced three-phase electrical distribution systems. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, London, v. 33, p. 901–911, nov. 2021.
- MACEDO, L. H.; FRANCO, J. F.; MAHDAVI, M.; ROMERO, R. A contribution to the optimization of the reconfiguration problem in radial distribution systems. *Journal of Control*,

Automation and Electrical Systems, London, v. 29, n. 6, p. 756–768, set. 2018.

MACEDO, L. H.; HOME-ORTIZ, J. M.; VARGAS, R.; MANTOVANI, J. R.; ROMERO, R.; CATALÃO, J. P. Short-circuit constrained distribution network reconfiguration considering closed-loop operation. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Amsterdam, v. 32, p. 100937, dez. 2022.

MACEDO, L. H.; MUÑOZ-DELGADO, G.; CONTRERAS, J.; ROMERO, R. Optimal restoration of distribution networks through reconfiguration and microgrid formation. In: *2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*. The Hague: [s.n.], 2020. v. 64, p. 1231–1235.

MACEDO, L. H.; MUÑOZ-DELGADO, G.; CONTRERAS, J.; ROMERO, R. Optimal service restoration in active distribution networks considering microgrid formation and voltage control devices. In: *2020 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*. Istanbul: [s.n.], 2020. p. 1–6.

MACEDO, L. H.; MUÑOZ-DELGADO, G.; CONTRERAS, J.; ROMERO, R. Optimal service restoration in active distribution networks considering microgrid formation and voltage control devices. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Piscataway, v. 57, n. 6, p. 5758–5771, nov. 2021.

MACEDO, L. H.; ROMERO, R. Meta-heurística BVNS especializada para resolver o problema da reconfiguração de sistemas de distribuição operando em vários níveis de demanda. In: *Anais do XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. Porto de Galinhas: [s.n.], 2015. p. 1028–1039.

MACEDO, L. H.; ROMERO, R. Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável. In: *Anais do XLVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. Salvador: [s.n.], 2015. p. 1146–1157.

MAHDAVI, E.; ASADPOUR, S.; MACEDO, L. H.; ROMERO, R. Reconfiguration of distribution networks with simultaneous allocation of distributed generation using the whale optimization algorithm. *Energies*, Basel, v. 16, n. 12, p. 1–19, jun. 2023.

MARQUES, L. T.; DELBEM, A. C. B.; LONDON, J. B. A. Service restoration with prioritization of customers and switches and determination of switching sequence. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Piscataway, v. 9, n. 3, p. 2359–2370, maio 2017.

MLADENOVIC, N.; HANSEN, P. Variable neighborhood search. *Computers & Operations Research*, Oxford, v. 24, n. 11, p. 1097–1100, nov. 1997.

MONTSUTSUMI, M. M.; MELCHOR, J. N.; MACEDO, L. H.; ROMERO, R. Joint reconfiguration of feeders and allocation of capacitor banks in distribution systems using a multi-start strategy. In: *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*. Quito: [s.n.], 2017. v. 10, p. 1–6.

PERALTA, R. A. V.; LEITE, J. B.; MANTOVANI, J. R. S. Automatic restoration of large-scale distribution networks with distributed generators, voltage control devices and heating loads. *Electric Power Systems Research*, Amsterdam, v. 176, p. 105925, nov. 2019.

- POUDEL, S.; DUBEY, A. A two-stage service restoration method for electric power distribution systems. *IET Smart Grid*, Stevenage, v. 4, n. 5, p. 500–521, mar. 2021.
- PUERTA, G. F.; MACEDO, L. H.; SOARES, J.; ROMERO, R. A variable neighborhood descent algorithm for the service restoration problem of radial distribution systems. In: _____. *Distributed Computing and Artificial Intelligence, Special Sessions I, 20th International Conference*. Cham: Springer, 2023. p. 277–287.
- SHEN, F.; WU, Q.; XUE, Y. Review of service restoration for distribution networks. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, Nanjing, v. 8, n. 1, p. 1–14, Jan. 2019.
- SOUZA, E. S. *Novas modelagens matemáticas para otimização do problema de restauração em sistemas de distribuição de energia elétrica radiais*. 174 p. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Ilha Solteira, 2018.
- SOUZA, E. S.; PUERTA, G. F.; ROMERO, R. An AC mathematical model for solving complex restoration problems in radial distribution systems in a treatable runtime. *IEEE Access*, Piscataway, v. 8, p. 228303–228314, Dez. 2020.
- TELES, V.; MACEDO, L. H.; ROMERO, R. Estratégia heurística para a reconfiguração de sistemas de distribuição. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Automática 2020*. Porto Alegre: [s.n.], 2020. p. 1–7.
- VARGAS, R.; MACEDO, L. H.; HOME-ORTIZ, J. M.; MANTOVANI, J. R. S.; ROMERO, R. Optimal restoration of active distribution systems with voltage control and closed-loop operation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Piscataway, v. 12, n. 3, p. 2295–2306, maio 2021.
- VARGAS, R.; MACEDO, L. H.; HOME-ORTIZ, J. M.; ROMERO, R. Optimal restoration of distribution systems considering temporary closed-loop operation. *IEEE Systems Journal*, Piscataway, v. 15, n. 4, p. 5483–5494, dez. 2021.
- YAMAMOTO, R. Y.; PINTO, T.; ROMERO, R.; MACEDO, L. H. Specialized tabu search algorithm applied to the reconfiguration of radial distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Amsterdam, 2024.
- ZIMMERMAN, R. D.; MURILLO-SANCHEZ, C. E.; THOMAS, R. J. Matpower: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 26, n. 1, p. 12–19, fev. 2011.