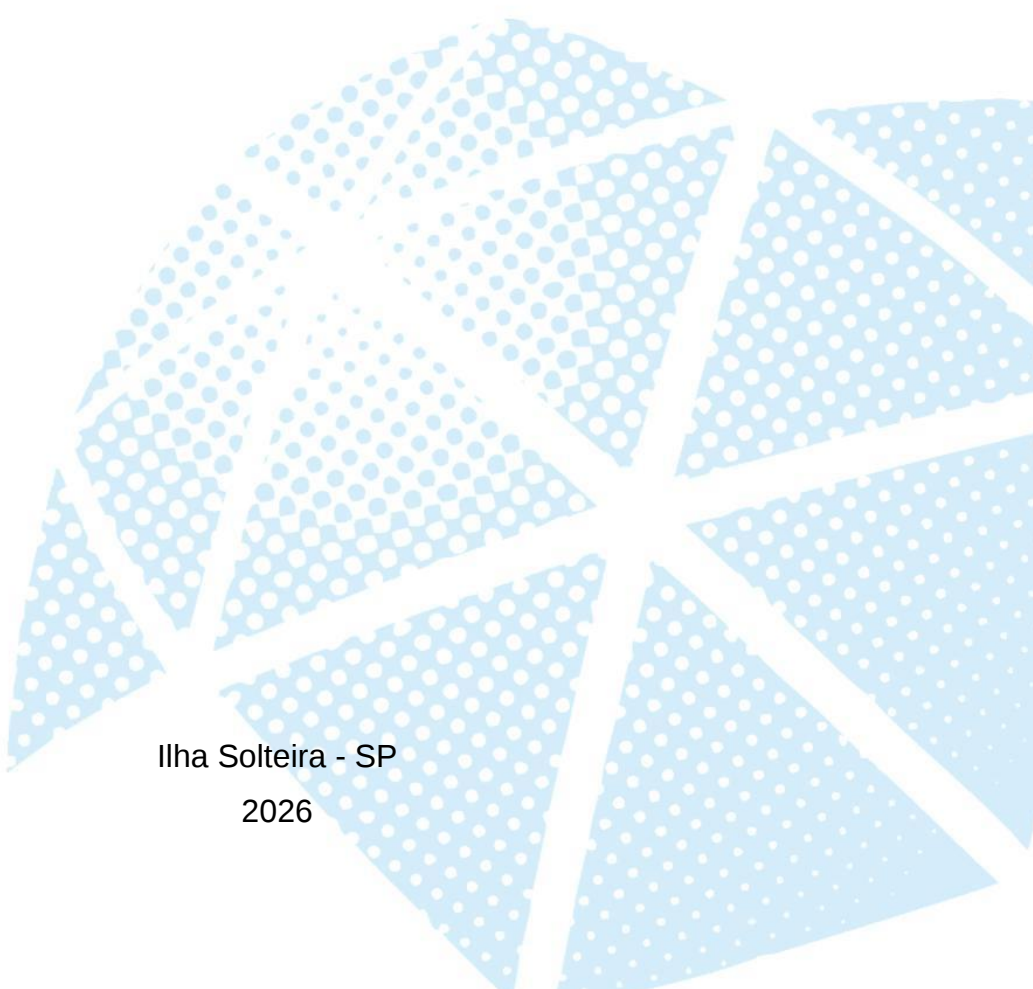


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

Gustavo dos Santos Barbosa

**Restauração automática de Redes com Recursos Energéticos Distribuídos e
Formação de Microrredes**

Ilha Solteira - SP
2026



Gustavo dos Santos Barbosa

**Restauração automática de Redes com Recursos Energéticos Distribuídos e
Formação de Microrredes**

Trabalho de Graduação apresentado à
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,
para obtenção do título de Grau acadêmico
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas elétricos
de potência.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto
Sanches Mantovani

Ilha Solteira - SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B238r Barbosa, Gustavo dos Santos.
Restauração automática de redes com recursos energéticos distribuídos e
formação de microrredes / Gustavo dos Santos Barbosa. -- Ilha Solteira: [s.n.],
2026
69 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,
2026

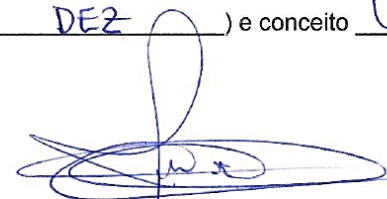
Orientador: José Roberto Sanches Mantovani

Inclui bibliografia

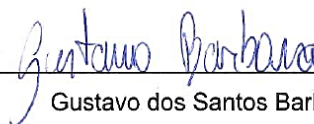
1. Busca tabu. 2. General variable neighborhood search. 3. Geração
distribuída. 4. Microrredes. 5. Recursos energéticos. 6. Redes elétricas.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

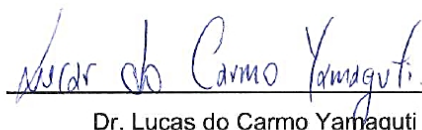
Aos dezesseis dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e seis, o discente **Gustavo dos Santos Barbosa**, matriculado sob o nº 212054287, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani, o Dr. Lucas do Carmo Yamaguti e o Mestrando Luis Eduardo Mezas Madeira, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**Restauração automática de Redes com Recursos Energéticos Distribuídos e Formação de Microrredes**", obtendo a nota 10,0 (DEZ) e conceito Aprovado.



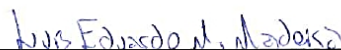
Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani
- orientador -



Gustavo dos Santos Barbosa
- discente -



Dr. Lucas do Carmo Yamaguti
- Membro da Banca -



Mestrando Luis Eduardo Mezas Madeira
- Membro da Banca -

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A principal contribuição deste trabalho é o desenvolvimento de dois algoritmos baseados em metaheurísticas para a restauração de redes de distribuição, visando entregar soluções de alta qualidade para o problema de restauração de redes de distribuição radiais em um tempo computacional compatível com a operação em tempo real. Ambos os algoritmos possibilitam que o operador do sistema disponha de um plano de ação preciso para isolar faltas e formar microrredes de maneira automática, maximizando o atendimento de cargas mesmo em cenários de múltiplas falhas. Social e economicamente, o impacto se apresenta na redução direta dos índices de interrupção do fornecimento e, consequentemente, das compensações financeiras pagas pelas distribuidoras à ANEEL. Educacionalmente, o projeto fortalece a linha de pesquisa em redes inteligentes da UNESP, relacionando o desenvolvimento de algoritmos metaheurísticos com as necessidades práticas do setor elétrico nacional.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The main contribution of this work is the development of two algorithms based on metaheuristics for the restoration of distribution networks, aiming to deliver high-quality solutions for the restoration problem of radial distribution networks within a computational time compatible with real-time operation. Both algorithms enable the system operator to have a precise action plan to isolate faults and automatically form microgrids, maximizing load service even in multiple failure scenarios. Socially and economically, the impact is reflected in the direct reduction of interruption indices and, consequently, the financial compensations paid by distribution companies to ANEEL. Educationally, the project strengthens the research line in smart grids at UNESP, connecting the development of metaheuristic algorithms with the practical needs of the national electricity sector.

Dedico este trabalho à Flávia, à Camila e ao Regivan.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao meu orientador, Professor José Roberto Sanches Mantovani.

Aos doutores Renzo Amilcar Vargas Peralta e Juan Manuel Home Ortiz, pelas valiosas contribuições ao meu conhecimento.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela concessão das bolsas de pesquisa (processo n° 8846; processo n° 15311; processo n° 19776).

“E verão o seu rosto, e nas suas testas estará o seu nome” (Bíblia Sagrada, Apocalipse 22:4).

RESUMO

Para evitar penalidades pelo não cumprimento dos índices de continuidade de fornecimento propostos por agências reguladoras como a ANEEL e restabelecer o fornecimento sob contingências permanentes, neste trabalho é apresentada uma metodologia prática para a restauração automática de redes aéreas radiais de distribuição de energia elétrica sob condições de contingências permanentes. O objetivo principal consiste em restabelecer o fornecimento de energia ao maior número de consumidores afetados em tempo computacional compatível com a operação em tempo real, respeitando rigorosamente as restrições físicas e operacionais do sistema. Modela-se matematicamente recursos energéticos distribuídos, contemplando a intermitência da geração distribuída fotovoltaica, a lógica operativa de sistemas de armazenamento de energia em baterias e o controle de geradores síncronos voltados ao suprimento autônomo de cargas emergenciais por meio da formação de microrredes. Para a resolução do problema proposto realiza-se reconfiguração topológica via manobras em chaves seccionadoras; desenvolve-se e compara-se dois algoritmos baseados em metaheurísticas de otimização: a Busca Tabu e a Busca em Vizinhança Variável Geral. A topologia da rede é mapeada por meio da representação nó-profundidade para assegurar a radialidade do sistema, enquanto as variáveis de estado elétricas são determinadas dinamicamente por fluxos de potência executados na ferramenta MATLAB/MATPOWER. Os algoritmos foram validados e testados em um sistema composto por 53 nós e 3 subestações, sob patamares temporais distintos para capturar as variações de carga e irradiação solar. Os resultados demonstraram a robustez de ambas as técnicas, que convergiram para soluções viáveis de alta qualidade em cenários de faltas simples e múltiplas. A integração estratégica de baterias e painéis fotovoltaicos elevou significativamente os índices de atendimento local, enquanto a atuação do gerador síncrono garantiu a restauração de cargas prioritárias. A Busca Tabu apresentou maior consistência e rapidez computacional devido à sua natureza determinística e à eficiência de suas memórias de curto e longo prazos. Por outro lado, o algoritmo de vizinhança variável geral exibiu maior capacidade de exploração do espaço de busca em cenários específicos, propiciada pelas características estocásticas de sua etapa de diversificação. Conclui-se que as metodologias propostas constituem ferramentas eficazes para a automação e melhoria dos índices de confiabilidade regulatórios de redes inteligentes.

Palavras-chave: busca tabu; *general variable neighborhood search*; geração distribuída; microrredes; recursos energéticos; redes elétricas.

ABSTRACT

To avoid penalties for non-compliance with continuity of supply indicators proposed by regulatory agencies such as ANEEL and to restore supply under permanent contingencies, this work presents a practical methodology for the automatic restoration of radial overhead electric power distribution networks under permanent contingency conditions. The main objective consists in restoring the power supply to the largest number of affected consumers within a computational time compatible with real-time operation, strictly respecting the physical and operational constraints of the system. Distributed energy resources are mathematically modeled, contemplating the intermittency of distributed photovoltaic generation, the operating logic of battery energy storage systems, and the control of synchronous generators aimed at the autonomous supply of emergency loads through microgrid formation. To solve the proposed problem, topological reconfiguration is performed via tie-switch operations; two algorithms based on optimization metaheuristics are developed and compared: Tabu Search and General Variable Neighborhood Search. The network topology is mapped using the node-depth representation to ensure system radiality, while the electrical state variables are dynamically determined by power flows executed in the MATLAB/MATPOWER tool. The algorithms were validated and tested on a system composed of 53 nodes and 3 substations, under different time steps to capture load and solar irradiation variations. The results demonstrated the robustness of both techniques, which converged to high-quality feasible solutions in single and multiple fault scenarios. The strategic integration of batteries and photovoltaic panels significantly raised local service indices, while the performance of the synchronous generator guaranteed the restoration of priority loads. Tabu Search presented greater consistency and computational speed due to its deterministic nature and the efficiency of its short- and long-term memories. On the other hand, the general variable neighborhood search algorithm exhibited greater search space exploration capacity in specific scenarios, provided by the stochastic characteristics of its diversification step. It is concluded that the proposed methodologies constitute effective tools for the automation and improvement of regulatory reliability indices of smart grids.

Keywords: tabu search; general variable neighborhood search; electrical grids; distributed generation; microgrids; energy resources.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema radial e sua RNP	30
Figura 2 - Atuação da LT curta.....	33
Figura 3 - Representação em diagrama de blocos do algoritmo BT	36
Figura 4 - Representação em diagrama de blocos do algoritmo GVNS.....	41
Figura 5 - Topologia inicial do sistema de 53 nós	42
Figura 6 - Perfis das cargas residencias e comerciais	43
Figura 7 - Curva de Geração de energia dos GDFs em função do horário	43
Figura 8 - Relação entre curva de carga, geração e armazenamento de energia no nó 13, contingência às 01h00	45
Figura 9 - Ilha formada por 4 cargas (a) e respectivo ponto de operação do GS (b)	46
Figura 10 - Ilha formada por 1 carga (a) e respectivo ponto de operação do GS (b)	46
Figura 11 - Topologia da solução encontrada pela BT para contingência no nó 3 às 01h00, sem GDF, SAE, GS.....	49
Figura 12 - Topologia da solução encontrada por GVNS para contingência no nó 3 às 01h00, sem GDF, SAE, GS.....	50
Figura 13 - Topologia da solução fornecida pelo BT para contingência no nó 3 às 01h00, com GDFs e SAEs	51
Figura 14 - Topologia da solução fornecida pelo GVNS para contingência no nó 3 às 01h00, com GDFs e SAEs	52
Figura 15 - Topologia da solução fornecida pelo BT para contingência no nó 3 às 01h00, com GDFs, SAEs e operação ilhada via GS	53
Figura 16 - Topologia da solução fornecida pelo GVNS para contingência no nó 3 às 01h00, com GDFs, SAEs e operação ilhada via GS	54
Figura 17 - Comportamento dos GDFs e SAEs nos nós 25, 50, 31 e 8 durante falta em 3 à 01h00	55
Figura 18 - Comportamento do gerador síncrono alocado no nó 4, falta no nó 3 à 01h00	56
Figura 19 - Evolução da solução corrente do algoritmo BT ao longo das iterações, falta nos nós 11, 14 e 21 à 01h, com GDFs e SAEs	60
Figura 20 - Evolução da solução corrente do algoritmo GVNS por iteração - Falta simultânea nos nós 11, 14 e 21 à 01h, com operação de GDFs e SAEs - Resultado obtido de 78% de restauração.....	61

Figura 21 - Evolução da solução corrente do algoritmo GVNS ao longo das iterações, falta simultânea nos nós 11, 14 e 21 à 01h, com operação de GDFs e SAEs - Resultado obtido de 74% de restauração62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados de restauração para contingência no nó 3.	48
Tabela 2 - Resultados de restauração para contingências nos nós 11 e 14.	57
Tabela 3 - Resultados de restauração para contingências nos nós 11, 14 e 21.	58
Tabela 4 - Limites de correntes individuais por ramo	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BT	Busca Tabu
CA	Corrente Alternada
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FEIS	Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
GD	Geração Distribuída
GDF	Geração distribuída fotovoltaica
GS	Gerador Síncrono
GVNS	<i>General Variable Neighborhood Search</i> (Busca em Vizinhança Variável Geral)
LT curta	Lista Tabu de Curta Duração
LT longa	Lista Tabu de Longa Duração
NC	Número de Camadas
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
PVs	Painéis Fotovoltaicos
REDs	Recursos Energéticos Distribuídos
RNP	Representação Nó-Profundidade
SAE	Sistema de armazenamento de energia
SE	Subestação
TG	Trabalho de Graduação
UNESP	Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
UTI	Unidade de Terapia Intensiva
VND	<i>Variable Neighborhood Descent</i> (Descida em Vizinhança Variável)
VNS	<i>Variable Neighborhood Search</i> (Busca em Vizinhança Variável)

LISTA DE SÍMBOLOS

C_i	Peso ou quantidade de consumidores associados à carga i
δ	Coeficiente potência-temperatura do módulo fotovoltaico
Δt	Intervalo de tempo entre dois instantes consecutivos
E_j	Energia armazenada no sistema de armazenamento no instante j
$E_{m\acute{a}x}$	Nível máximo de capacidade de energia armazenada
E_{min}	Nível mínimo de capacidade de energia armazenada
G	Irradiância solar horária
I_r	Corrente elétrica que percorre o ramo r
$I_{r,m\acute{a}x}$	Capacidade máxima de condução de corrente do ramo r
Ω_r	Conjunto de ramos do sistema elétrico
Ω_s	Conjunto de todas as cargas do sistema elétrico
φ	Ângulo do fator de potência
$NSEs$	Número de subestações do sistema
$P_{gd, forn}$	Potência ativa total fornecida pela geração distribuída fotovoltaica
P_{gs}	Potência ativa injetada pelo gerador síncrono
P_j	Potência ativa de operação do armazenamento no instante j
P_{max}	Limite máximo de potência do sistema de armazenamento
P_{min}	Limite mínimo de potência do sistema de armazenamento
P_n	Potência nominal do módulo fotovoltaico
P_p	Potência ativa fornecida por um único módulo fotovoltaico
$P_{SE,k}$	Potência ativa total fornecida pela subestação k
$Q_{gd, forn}$	Potência reativa fornecida pela geração distribuída fotovoltaica
Q_{gs}	Potência reativa injetada ou absorvida pelo gerador síncrono
$Q_{se,k}$	Potência reativa total fornecida pela subestação k
S_{max}	Potência aparente máxima nominal do gerador síncrono
$S_{max, k}$	Potência aparente limite de fornecimento da subestação k
S_{SE_k}	Potência aparente total fornecida pela subestação k
T_{amb}	Temperatura ambiente registrada
T_{cel}	Temperatura de operação da célula fotovoltaica

V_i	Módulo da magnitude de tensão na barra ou carga i
$V_{m\acute{a}x}$	Limite máximo de magnitude de tensão do sistema
$V_{m\acute{i}n}$	Limite mínimo de magnitude de tensão do sistema
x_i	Variável binária de decisão de atendimento da carga i
x_r	Variável binária que determina o estado do ramo r
n^+	Eficiência do processo de carga do sistema de armazenamento
n^-	Eficiência do processo de descarga do sistema de armazenamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	JUSTIFICATIVA	20
1.2	OBJETIVOS	20
1.3	ESTRUTURA DO TEXTO	21
2	DESENVOLVIMENTO	22
2.1	O PROBLEMA DE RESTAURAÇÃO DE REDES	23
2.1.1	Função objetivo	23
2.1.2	Geração distribuída fotovoltaica – GDF	24
2.1.3	Sistemas de armazenamento de energia – SAE	25
2.1.4	Curva de capacidade térmica do gerador síncrono	27
2.1.5	Restrições	28
2.2	REPRESENTAÇÃO NÓ-PROFUNDIDADE (RNP)	30
2.3	FLUXO DE POTÊNCIA	31
2.4	BUSCA TABU.....	31
2.5	APLICAÇÃO DO ALGORITMO BT NA RESTAURAÇÃO DE REDES	32
2.6	BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL GERAL	36
2.7	APLICAÇÃO DO ALGORITMO GVNS NA RESTAURAÇÃO DE REDES	38
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
3.1	FALTA NO NÓ 3.....	48
3.2	FALTA NOS NÓS 11 E 14	57
3.3	FALTA NOS NÓS 11, 14 E 21	58
4	CONCLUSÕES	64
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	66
	APÊNDICE A - INFORMAÇÕES SOBRE AS CONEXÕES DO SISTEMA	
	DE 53 NÓS.....	68
	DADOS CURRICULARES.....	69

1 INTRODUÇÃO

A infraestrutura das redes elétricas atualmente em operação transcende sua dimensão técnica, consolidando-se como um bem de serviço essencial para o progresso tecnológico e o bem-estar social. A manutenção e operação desse ativo enfrentam o desafio do crescimento ininterrupto da demanda energética, impulsionado pela diversificação dos perfis de consumo e pela crescente eletrificação dos setores produtivo e residencial. A estrutura operacional da rede divide-se fundamentalmente em três etapas: a geração, onde ocorre a conversão de fontes primárias em eletricidade; a transmissão, composta por vastas linhas que transportam a energia até os centros de carga; e a distribuição, responsável principalmente pelo abastecimento de qualidade aos consumidores finais.

As redes de distribuição, em sua maioria, compostas por redes radiais aéreas, estão sujeitas a contingências acidentais ou desligamentos programados para manutenção, comprometendo a operação normal da rede, que por consequência interrompe o abastecimento ao(s) consumidor(es). Mais de 80% das interrupções do fornecimento de energia são provenientes de faltas nas redes de distribuição (Song *et al.*, 2010), sendo classificadas como faltas temporárias e permanentes. As faltas temporárias são rapidamente eliminadas, enquanto que as faltas permanentes podem causar danos estruturais na rede, ou manutenções que demandam tempos superiores a três minutos. As redes nacionais estão sujeitas a uma transição paradigmática com a integração massiva de novas tecnologias como os recursos energéticos distribuídos (REDs), com destaque para a geração distribuída fotovoltaica (GDF), os Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE) e, adicionalmente, a existência de cargas prioritárias que não permitem a ausência de abastecimento de energia devido a fatores socio-econômicos.

Nesse cenário de crescente complexidade e necessidade de confiabilidade do fornecimento de energia, eficiência técnica e operacional, o conceito das redes inteligentes ou *smart grids* representa uma evolução significativa dos sistemas tradicionais de distribuição de energia elétrica. Uma rede inteligente é caracterizada pela conexão bidirecional de fluxos de eletricidade e sistema de informação para criar uma rede de distribuição automatizada e resiliente. Esse conceito incorpora à rede elétrica os benefícios das comunicações modernas para fornecer informações em tempo real e permitir o equilíbrio quase instantâneo da oferta e da gestão da demanda

(Yan *et al.*, 2013). As *smart grids* integram tecnologias de informação, sensores e sistemas de controle à infraestrutura elétrica, tornando o sistema mais dinâmico, interativo e confiável. Essa modernização possibilita a automação de processos, como a detecção e o isolamento de faltas, a restauração do fornecimento e o gerenciamento de cargas. Devido à automação da rede, o tempo e a frequência das interrupções no fornecimento de energia são reduzidos e, consequentemente, os índices de confiabilidade são melhorados (Elkadeem *et al.*, 2018).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regula a qualidade e a continuidade do serviço de fornecimento por meio de indicadores coletivos de continuidade, o DEC (duração equivalente de interrupção por unidade consumidora), expresso em horas por unidade consumidora, e o FEC (frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora), expresso em interrupções por unidade consumidora. Esses indicadores são definidos e apurados conforme o Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST), que estabelece critérios de contabilização, exceções e limites anuais por conjunto de unidades consumidoras (ANEEL, PRODIST Módulo 8, 2021). As distribuidoras devem reportar periodicamente os valores de DEC e FEC, que também compõem o componente de qualidade da regulação econômico-tarifária. O descumprimento dos limites regulatórios pode acarretar sanções, inclusive multa, proporcional à gravidade e à abrangência da infração.

Diante desse cenário, torna-se imperativo que as concessionárias adotem modelos de operação mais eficazes, capazes de assegurar os níveis de qualidade e confiabilidade preestabelecidos pelos órgãos reguladores. Para isso, a integração estratégica e inteligente dos novos recursos energéticos à rede elétrica juntamente com uma manutenção e operação eficaz dos mesmos, consolidam-se como princípios fundamentais para o atendimento das exigências de um mercado em constante evolução.

A integração sinérgica de GDF com SAE permite que o excedente de energia gerada localmente seja armazenado para suprir a demanda ativa local em períodos de baixa irradiância solar, por exemplo. Complementarmente, a instalação na rede de geradores síncronos (GS) (como termelétricos) viabiliza o controle de frequência e o atendimento pleno de cargas prioritárias (como UTIs e centros cirúrgicos hospitalares) independentemente da rede principal. Essa funcionalidade assegura a continuidade do serviço em trechos que, em modelos convencionais, permaneceriam

desenergizados em cenários de falta, elevando os índices de confiabilidade operacional.

Para resolver o problema de restauração, este trabalho propõe a utilização e comparação de duas metaheurísticas de otimização para obtenção de topologias que forneçam soluções factíveis e de alta qualidade, sendo elas: Busca Tabu (BT) e Busca em Vizinhaça Variável Geral (*General Variable Neighborhood Search* - GVNS). Para dados de entrada genéricos, como localização(ões) e quantidade de faltas, período do dia em que ocorrem as contingências, localização e quantidades de GDFs associados a SAEs e localidade do GS para possibilidade de abastecimento local autônomo, os algoritmos desenvolvidos, automaticamente, exploram o espaço de busca para maximizar a porcentagem de cargas restauradas.

1.1 JUSTIFICATIVA

As condições e tendências de projeto e operação das redes de distribuição e a necessidade de manter os índices de continuidade adequados e estabelecidos por normas técnicas, tornam este estudo importante pela crescente necessidade de aprimorar os processos de restauração em sistemas de distribuição radiais, de modo a reduzir o tempo e a frequência das interrupções no fornecimento de energia e, consequentemente, melhorar os índices de continuidade estabelecidos nas normas da ANEEL. Além disso, a crescente inserção de geração distribuída, sistemas de armazenamento de energia e cargas prioritárias nas redes de distribuição impõem novos desafios operacionais, exigindo metodologias de restauração mais flexíveis, rápidas e compatíveis com o ambiente das redes inteligentes.

Torna-se relevante, portanto, o desenvolvimento de abordagens computacionais para restauração da rede capazes de oferecer soluções eficientes e em tempo computacional adequado para a tomada de decisões, contribuindo para a automação, confiabilidade e modernização dos sistemas elétricos de distribuição.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é apresentar uma metodologia prática de restauração automática para redes de distribuição radiais sob contingência, utilizando

a reconfiguração do sistema por meio de manobras em chaves seccionadoras. Os objetivos específicos incluem:

- Implementar o fator horário para considerar a variabilidade das demandas, perfis de carga e a intermitência da irradiação solar;
- Desenvolver uma lógica de operação conjunta entre GDFs e SAEs, visando maximizar o atendimento da carga local e a resiliência durante os períodos de interrupção e o sistema operando no estado restaurativo;
- Desenvolver a lógica de controle para GS, permitindo o suprimento autônomo de cargas prioritárias em situações de isolamento da rede principal;
- Assegurar o cumprimento dos limites físicos de tensão nos nós, corrente nos alimentadores e capacidade de fornecimento das subestações, preservando rigorosamente a topologia radial da rede;
- Desenvolver algoritmos que garantam tempos de processamento compatíveis com a operação sistêmica, aumentar a eficácia do processo de restauração e reduzir os indicadores de continuidade do sistema;
- Comparar a eficiência e a robustez das metaheurísticas BT e GVNS na resolução do problema de reconfiguração restaurativa.

1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

Este documento é composto por quatro capítulos. Além desta introdução, o Capítulo 2 aborda o desenvolvimento teórico e as técnicas de solução propostas, detalhando-os. No Capítulo 3, apresentam-se os resultados e discussões dos testes computacionais realizados em sistema da literatura especializada. Por fim, no Capítulo 4 apresentam-se as conclusões do trabalho de pesquisa com as considerações finais. O apêndice A apresenta os limites de corrente para cada chave seccionadora do sistema de 53 nós abordado.

2 DESENVOLVIMENTO

As metodologias propostas baseiam-se nas metaheurísticas BT e GVNS, desenvolvidas para explorar o espaço de busca de maneira inteligente e eficaz, direcionando, ao longo das iterações, para uma solução de alta qualidade. A topologia da rede aérea radial é representada por meio da codificação nó-profundidade, que organiza o sistema em camadas hierárquicas a partir da subestação, auxiliando no processamento de informações e cumprimento da restrição de radialidade. Utiliza-se o programa computacional de cálculo de fluxo de potência, através da ferramenta MATPOWER, para determinação das variáveis de estado em todos os nós da rede de distribuição. No modelo são consideradas unidades de GDFs e SAEs, de forma a otimizar sua contribuição de fornecimento de energia local durante o processo de restauração, além de carga prioritária instalada com GS como fonte secundária de energia, que garante fornecimento à carga em operação ilhada, caso a mesma permaneça desconectada da rede na solução fornecida pelo algoritmo. A quantidade e a localização das cargas para o sistema operando sob contingências, localização dos recursos de geração local e armazenamento, e a localização do GS para abastecimento da carga prioritária, bem como o horário em que ocorre a falta, são dados de entrada do algoritmo fornecidos pelo usuário.

As cargas elétricas do sistema são consideradas adotando-se perfis típicos de consumo residencial e comercial, permitindo representar as variações da demanda ao longo do período analisado. Adota-se um intervalo de 2 horas para a duração do estado restaurativo, sendo a topologia obtida por meio do algoritmo de solução validada para ambos os instantes de tempo.

A seção 2.1 apresenta a função objetivo, modelagens de GDF, SAE e GS, e restrições técnicas e operacionais considerados. Adota-se uma metodologia de codificação dos sistemas fundamentada na representação nó-profundidade (subseção 2.2), a qual assegura a radialidade da rede. O estado operacional do sistema é obtido por meio do cálculo de um programa de fluxo de potência (subseção 2.3). Na subseção 2.4 descrevem-se os princípios da metaheurística BT, enquanto na subseção 2.5 apresenta-se sua aplicação na solução do processo otimizado de restauração de redes. Na subseção 2.6 descrevem-se os princípios da metaheurística

GVNS, enquanto na subseção 2.7 apresenta-se sua aplicação na solução do processo otimizado de restauração de redes.

2.1 O PROBLEMA DE RESTAURAÇÃO DE REDES

Na ocorrência de faltas permanentes, busca-se restabelecer o fornecimento de energia ao maior número possível de cargas atingidas (função objetivo), por meio da alteração topológica da rede em conformidade com restrições físicas e operacionais do sistema e aproveitando-se os recursos de GDFs, SAEs e GS instalados no sistema. Nas seções seguintes, apresentam-se as formulações matemáticas da função-objetivo, restrições adotadas e recursos considerados.

2.1.1 Função objetivo

Nessa sessão é apresentada o termo da função objetivo dos algoritmos.

a. Minimizar a quantidade de cargas desenergizadas

A função objetivo considerada consiste em minimizar o número de consumidores afetados após a isolação das faltas. O termo da função objetivo que representa a minimização da potência dos consumidores fora de serviço é definido pela Equação (1).

$$\min \sum_{i \in \Omega_n} x_i \quad (1)$$

Em que:

- Ω_n : conjunto de todas as cargas do sistema.
- i : índice que representa cada carga pertencente ao conjunto Ω_n .
- x_i : variável binária de decisão que indica o estado de atendimento da carga i , sendo $x_i = 0$ se a carga for energizada e $x_i = 1$ se a carga permanecer desenergizada.

A variável binária x_i atua como o indicador de desatendimento de cada unidade de carga no somatório da Equação (1). Quando a carga i está energizada, $x_i = 0$, o

que anula sua inclusão no somatório. Por outro lado, caso a carga permaneça desenergizada, $x_i = 1$, fazendo com que essa unidade seja contabilizada na função objetivo. Desse modo, a minimização matemática do modelo impõe que o algoritmo de otimização configure as manobras de rede para forçar o maior número possível de variáveis x_i ao estado nulo, minimizando o quantitativo absoluto de cargas afetadas e maximizando o restabelecimento do sistema.

2.1.2 Geração distribuída fotovoltaica – GDF

A instalação de GDF nos nós do alimentador permite que uma parcela da demanda seja suprida localmente por essa geração nos períodos em que possa estar fornecendo energia. Considerando-se a instalação de GDs fotovoltaicas, a energia produzida pelos módulos fotovoltaicos (PVs) é obtida a partir das Equações 2-5 (Montoya-bueno; Munoz; Contreras, 2015):

$$P_p = P_n \left(\frac{G}{1000} \right) [1 + \delta(T_{cel} - 25)] \quad (2)$$

Em que:

- P_p : potência fornecida pelo módulo fotovoltaico [W].
- P_n : potência nominal do módulo fotovoltaico [W].
- G : irradiância solar [W/m^2].
- T_{cel} : temperatura da célula [$^{\circ}C$].
- δ : coeficiente potência-temperatura [$1/^{\circ}C$].

$$T_{cel} = T_{amb} + \left(\frac{N_{OCT} - 20}{800} \right) G \quad (3)$$

Em que:

- T_{cel} : temperatura da célula [$^{\circ}C$].
- T_{amb} : temperatura ambiente [$^{\circ}C$].
- G : irradiância solar [W/m^2].
- N_{OCT} : temperatura nominal de operação da célula [$^{\circ}C$].

$$P_{gd, forn} = N_{pv} \cdot P_p \quad (4)$$

Em que:

- $P_{gd, forn}$: potência ativa total da GDF [W].
- N_{pv} : número de módulos fotovoltaicos.
- P_p : potência por módulo [W].

$$Q_{gd, forn} = P_{gd, forn} \cdot \tan(\varphi) \quad (5)$$

Em que:

- $Q_{gd, forn}$: potência reativa fornecida pela GDF [VAR].
- φ : ângulo do fator de potência [°].
- $P_{gd, forn}$: potência ativa total da GDF [W].

A partir da Equação (3) obtém-se a temperatura da célula fotovoltaica em função da temperatura ambiente, irradiância solar e temperatura nominal de operação. Na Equação (2) obtém-se o valor de potência ativa gerada em função da potência fornecida pelo módulo fotovoltaico, coeficiente potência-temperatura, temperatura da célula e irradiância solar. A Equação (4) é responsável por quantificar as placas e relacionar a potência total fornecida do GDF com essas variáveis. A Equação (5) relaciona a potência reativa fornecida com a ativa através do ângulo do fator de potência.

No modelo dos geradores não despacháveis considera-se que a unidade de geração é conectada à rede por meio de inversores com capacidade de suporte de reativo (Smith *et al.*, 2011).

2.1.3 Sistemas de armazenamento de energia – SAE

Os sistemas de armazenamento de energia são modelados considerando a compatibilidade de horários entre a geração distribuída e a demanda, as eficiências dos processos de carga e descarga, os limites mínimo e máximo de capacidade de

armazenamento e as perdas horárias associadas à energia acumulada. A modelagem matemática de operação dos SAEs é dada pelas expressões 6 - 9 (Tavares, 2021).

$$E_{min} < E_j < E_{máx} \quad (6)$$

Em que:

- E_{min} : nível mínimo de energia armazenada [Wh].
- E_j : energia armazenada no instante j [Wh].
- $E_{máx}$: nível máximo de energia armazenada [Wh].

$$E_j = [(E_{j-1}) + (n^+) \cdot \Delta j \cdot P_j] \cdot P_j^+ + [(E_{j-1}) - \left(\frac{1}{n^-}\right) \cdot \Delta j \cdot P_j] \cdot (1 - P_j^+) \quad (7)$$

Em que:

- E_{j-1} : energia armazenada no instante j-1 [Wh].
- n^+ : eficiência do processo de carga.
- Δj : intervalo de tempo entre 2 instantes consecutivos [h].
- P_j : potência de operação no instante j [W].
- P_j^+ : variável binária que indica se a geração local é maior que a demanda no instante j ($P_j^+=1$), ou não ($P_j^+=0$).
- n^- : eficiência do processo de descarga.

$$P_{min} < P_j < P_{max} \quad (8)$$

Em que:

- P_{min} : limite mínimo de potência do sistema [W].
- P_j : potência de operação no instante j [W].
- P_{max} : limite máximo de potência do sistema [W].

$$E_{j+1} = E_j \cdot (1 - perdas_{porhora}) \quad (9)$$

Em que:

- E_{j+1} : energia armazenada no instante $j+1$ [Wh].
- $perdas_{porhora}$: perdas por hora [Wh].

A Equação (6) define os limites de carga mínimo e máximo para os SAEs. A Equação (7) define o estado atual de carga do SAE em função do estado anterior, e definindo se a bateria será carregada ou descarregada em função da variável P_j^+ , que indica se a geração local supera a demanda local no instante j (se sim $P_j^+=1$, senão, $P_j^+=0$). Também se considera eficiências de carga e descarga. A Equação (8) define os limites de carga mínimo e máximo para os SAEs. A Equação (9) define as perdas por hora na energia armazenada dos SAEs.

2.1.4 Curva de capacidade térmica do gerador síncrono

O GS utilizado para operação ilhada possui restrições operativas baseadas em limites térmicos e de estabilidade. O ponto operativo da máquina síncrona é definido pelas potências ativa e reativa, devendo respeitar simultaneamente o conjunto de Equações (10)-(12).

$$P_{gs} \leq \sqrt{S_{max}^2 - Q_{gs}^2} \quad (10)$$

$$|Q_{gs}| \leq 0,8 \cdot S_{max} \quad (11)$$

$$P_{gs} \geq 0 \quad (12)$$

Em que:

- P_{gs} : Potência ativa injetada pelo gerador síncrono [W].
- S_{max} : Potência aparente máxima nominal da máquina [VA].

- Q_{gs} : Potência reativa injetada ou absorvida pelo gerador síncrono [VAr].

A Equação (10) define o limite de corrente nas bobinas do estator. Operar acima dessa linha causaria superaquecimento por efeito Joule nos enrolamentos da armadura, danificando o isolamento da máquina. A Equação (11) define uma simplificação das fronteiras não lineares da curva de capacidade real de uma máquina síncrona. Na física da máquina síncrona, o extremo lateral direito (região sobreexcitada) é delimitado pelo limite térmico do rotor, visto que a injeção de reativos exige a elevação da corrente de campo, gerando risco de degradação do isolamento por superaquecimento. Por outro lado, o extremo lateral esquerdo (região subexcitada) é severamente restrito pelo limite de estabilidade estática e pelo limite de mínima excitação. A Equação (12) limita a máquina síncrona a operar como gerador.

2.1.5 Restrições

Nesta seção apresentam-se as restrições consideradas.

a. Magnitude de tensão

Os sistemas elétricos operam com magnitudes de tensão mantidas dentro de faixas preestabelecidas em torno do valor nominal, de modo a assegurar o funcionamento adequado das cargas conectadas. Para isso, adotam-se limites superior e inferior de variação das magnitudes de tensão, definidos pelas agências reguladoras ou normas, de forma a garantir a operação segura dos equipamentos e preservar o desempenho e a confiabilidade do sistema de distribuição.

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max}, \forall i \in \Omega_n \quad (14)$$

Em que:

- i : índice que representa as cargas do sistema.
- Ω_n : conjunto de cargas do sistema.
- V_i : módulo da magnitude de tensão na carga i [V].

- V_{min} : limite mínimo de tensão para as cargas do sistema [V].
- $V_{máx}$: limite máximo de tensão para as cargas do sistema [V].

b. Capacidade de fluxo nos ramos

Cada ramo do sistema possui limite térmico próprio de condução de corrente, o qual não deve ser excedido (apêndice A).

$$I_r \leq I_{r,máx}, \forall r \in \Omega_r \quad (15)$$

Em que:

- I_r : corrente percorrendo o ramo r [A].
- Ω_r : conjunto de ramos do sistema.
- $I_{r,máx}$: corrente máxima definida para cada ramo r [A].
- r : Índice que representa cada ramo do sistema.

c. Radialidade

A operação do sistema deve preservar a topologia radial em todas as condições operativas, de modo que, em uma rede conectada, o número de ramos energizados (fechados) não ultrapasse o número de cargas, subtraído do número de subestações. A verificação necessária para garantir radialidade pode ser efetuada através da representação nó-profundidade.

$$\sum_{(r \in \Omega_r)} x_r \leq nb - NSEs \quad (16)$$

Em que:

- x_r : variável binária que determina se o circuito entre as barras i e j está aberto (0) ou fechado (1).
- nb : número de barras do sistema.
- $NSEs$: número de subestações do sistema.

d. Capacidade de fornecimento das subestações

Os limites de fornecimento de potência aparente individuais são atribuídos a cada subestação do sistema.

$$S_{SE_k} = [\sqrt{(P_{SE,k})^2 + (Q_{SE,k})^2}] \leq S_{MAX,k}, \forall k \in \Omega_k \quad (17)$$

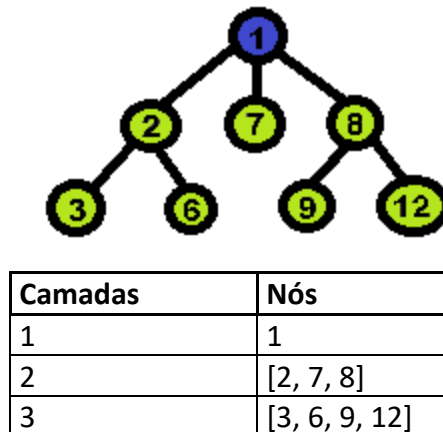
Em que:

- S_{SE_k} : Potência aparente total fornecida pela SE k [VA].
- $P_{SE,k}$: Potência ativa total fornecida pela SE k [W].
- $Q_{SE,k}$: Potência reativa total fornecida pela SE k [VAR].
- $S_{MAX,k}$: Potência aparente limite para fornecimento da SE k [VA].
- k : Índice de subestação, pertencente ao conjunto de subestações Ω_k .

2.2 REPRESENTAÇÃO NÓ-PROFUNDIDADE (RNP)

Na RNP, organizam-se, através de matrizes, grafos acíclicos chamados de árvores (Delbem *et al.*, 2004). O processo inicia-se no nó de origem, correspondente ao alimentador principal, e segue identificando os nós conectados em níveis sucessivos, até que todos os elementos da rede sejam mapeados. Esse procedimento gera uma estrutura em camadas, útil para manter a topologia radial e facilitar o cálculo das variáveis elétricas.

Figura 1 - Sistema radial e sua RNP



Fonte: Produção do próprio autor.

Identifica-se o número de camadas (NC) do grafo e os nós pertencentes a cada camada, e uma estrutura é organizada em uma matriz de dimensão $NC \times 2$, em que NC representa o número de camadas do alimentador. Em cada linha, são armazenados todos os nós correspondentes à respectiva camada, conforme ilustrado na Figura 1.

2.3 FLUXO DE POTÊNCIA

A análise de fluxo de potência em sistemas de distribuição fornece as variáveis de estado correspondentes a cada nó da rede, as magnitudes e ângulos de tensão, a partir das quais calculam-se os fluxos de potência ativa, reativa e as correntes nos ramos. No ambiente de simulação desenvolvido em MATLAB, essa etapa é executada utilizando as rotinas do software MATPOWER, o qual oferece ferramentas específicas, como a função `runpf` destinada à solução do problema de fluxo de potência de forma eficiente e confiável. Por padrão, a função `runpf` resolve um problema de fluxo de potência em corrente alternada (CA) usando um programa computacional que utiliza como técnica de solução do sistema de Equações não lineares, resultante da modelagem do sistema, o método de Newton. (Zimmerman; Murillo-Sánchez, 2020).

2.4 BUSCA TABU

A BT baseia-se na premissa de que para uma resolução de problema ser considerada inteligente, deve-se incorporar memória adaptativa e exploração responsiva. A metaheurística BT permite conduzir uma busca local de modo adaptativo para evitar ficar estagnada em soluções ótimas locais (Glover, 1995).

A BT é um método de otimização combinatória projetado para escapar de ótimos locais e explorar o espaço de soluções de forma inteligente. Fundamenta-se no uso de memória adaptativa, que registra características de soluções já visitadas e impede o retorno a configurações anteriormente exploradas por meio de listas tabu. Essa estrutura de memória, combinada a mecanismos como critérios de aspiração, intensificação e diversificação, permite equilibrar a exploração de novas regiões do espaço de busca e o refinamento de busca por ótimos locais de áreas promissoras

desse espaço. É capaz de utilizar informações acumuladas sobre o processo para guiar a seleção de vizinhos, podendo aceitar temporariamente soluções de menor qualidade para escapar de mínimos locais. Esse equilíbrio entre intensificação e diversificação torna a BT uma abordagem robusta para encontrar soluções de alta qualidade para problemas complexos (Lazaro; Oliveira, 2012).

2.5 APLICAÇÃO DO ALGORITMO BT NA RESTAURAÇÃO DE REDES

a. Representação e configuração inicial

O procedimento tem início com a análise do estado de todo o sistema em estudo, obtido por meio da resolução do fluxo de potência e da aplicação da representação nó-profundidade, conforme descrito nas subseções 2.1 e 2.3. A topologia inicial do sistema corresponde à sua configuração normal de operação, considerando a implementação dos recursos abordados, alterada pela abertura dos ramos associados às cargas onde ocorreram as faltas (isolação da falta).

b. Estrutura de vizinhança

A cada iteração do processo de restauração, o algoritmo define um novo conjunto de configurações candidatas composto por combinações possíveis de ramos capazes de restabelecer o fornecimento de energia às cargas afetadas. Para identificar as regiões afetadas, utiliza-se a RNP, que identifica as chaves seccionadoras capazes de reestabelecer o fornecimento nas áreas afetadas.

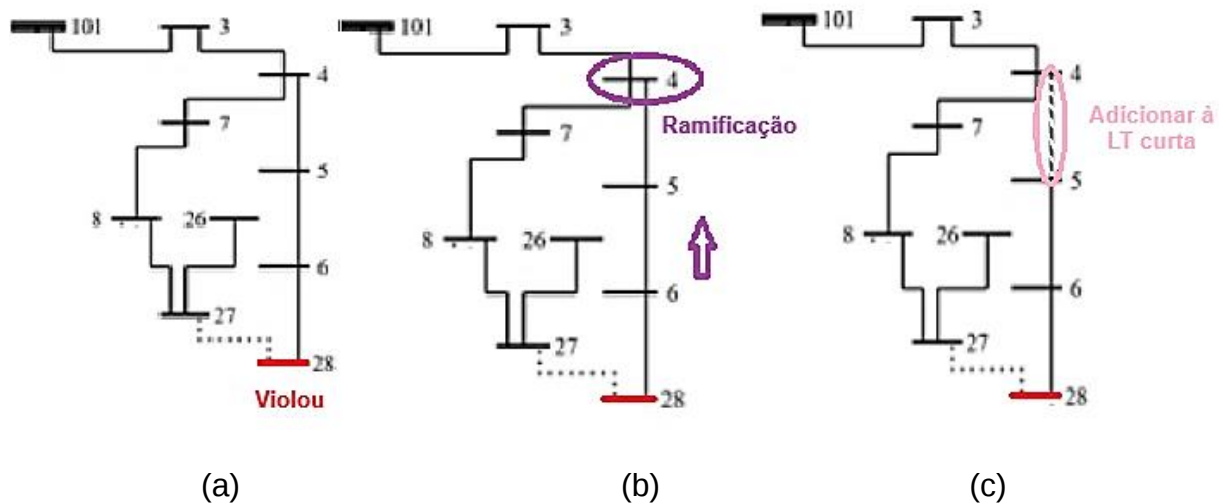
No algoritmo, a partir desse estágio, pode-se realizar uma escolha baseada em seu critério de vizinhança. O conjunto dessas chaves identificadas forma o espaço de busca local em cada iteração. Em cada tentativa de reconexão, o fluxo de potência é recalculado para verificar o atendimento dos limites das magnitudes de tensão e corrente.

No algoritmo desenvolvido o critério de vizinhança é o menor valor de demanda aparente das cargas sob análise.

c. Lista tabu

No algoritmo proposto, utilizam-se duas estruturas de controle baseadas no conceito de lista tabu, cuja função principal é impedir que o processo de busca retorne a configurações já exploradas, evitando a ciclagem (reexploração de um mesmo ponto já explorado do espaço) e desperdício de tempo computacional. A primeira delas, denominada Lista Tabu de curta duração (LT curta), atua de forma seletiva ao registrar, por um número restrito de iterações, as chaves abertas durante o processo restaurativo que integram uma ramificação. Ao se deparar com uma violação técnica nessa etapa, o algoritmo realiza uma varredura decrescente de camadas em direção à SE para verificar se o trajeto da carga atual pertence a alguma ramificação anteriormente explorada. Em caso afirmativo, o caminho sob avaliação é temporariamente desconectado da ramificação, forçando o algoritmo a explorar os demais segmentos dessa mesma ramificação.

Figura 2 - Atuação da LT curta



Fonte: Produção do próprio autor.

A segunda estrutura, denominada Lista Tabu de longa duração (LT longa), possui uma função restritiva e estratégica dentro do processo de busca. Sua finalidade é registrar chaves que representam o 'fim da linha' em segmentos de rede desprovidos de novas possibilidades de conexão, e também, chaves que foram responsáveis pelo isolamento inicial de faltas. Ao bloquear o acesso a esses ramos que não oferecem novas possibilidades de manobras ou de aprimoramento da função objetivo, a LT longa mitiga a ocorrência de ciclagem.

Durante a execução do algoritmo, ambas as listas são atualizadas de maneira dinâmica; a LT curta registra as chaves em pontos de ramificação cuja cargas a

jusante levaram a violações técnicas (como limites de corrente ou tensão), impedindo que essas combinações sejam reavaliadas precocemente durante o mesmo ciclo de busca, buscando sair de soluções ótimas locais. Por outro lado, a LT longa é ativada quando se identifica a exaustão de manobras em caminhos sem saída, e inclui também as chaves associadas ao isolamento das faltas. Dessa forma, o uso combinado das duas estruturas assegura uma busca eficiente, eliminando repetições desnecessárias e reduzindo o tempo de processamento para a convergência do algoritmo.

d. Critério de parada

O critério de parada interrompe a execução do algoritmo em 200 iterações, seguindo para a avaliação da formação da ilha em torno da carga emergencial com GS, caso necessário.

e. Execução do algoritmo BT

A partir da obtenção das informações de entrada fornecidas pelo usuário, executa-se o processo de restauração da rede de distribuição, conforme as etapas descritas a seguir.

- i. Leitura de dados elétricos e parâmetros físicos e de operação do sistema; isolar as faltas; calcular fluxo de potência pós-falta;
- ii. Criação da Lista Tabu (LT) de longa duração (evita ciclagens em chaves inutilizáveis) contendo inicialmente as chaves responsáveis por isolar as faltas;
- iii. É possível iniciar o processo de restauração por uma chave aberta de interesse fora da LT longa:

-**Sim:** Criar LT de curta duração (evita ciclagem durante o processo de restauração em chaves específicas (presentes em ramificações de ordem n)). Ir ao passo iv.

-**Não:** ir ao passo viii;

- iv. Se atingiu o critério de parada ir ao passo viii. Senão, ir ao passo v.
- v. Selecionar chave aberta de interesse fora das LTs; iniciar o estudo do processo de restauração a partir da chave escolhida. Executar fluxo de potência.
- vi. Ocorreram violações técnicas?

-**Sim:** Realizando a busca a partir da última carga estudada em direção à subestação que a alimenta, existe alguma ramificação (até a fronteira do que foi estudado)?

- Sim: abrir primeiro ramo identificado no caminho a fazer parte de uma ramificação e adicioná-lo a LT curta. Ir ao passo iv.
- Não: Abrir última chave estudada e adicioná-la a LT longa. Ir ao passo iv.

-**Não:** Ir ao passo vii.

- vii. Considerar a tentativa de restauração como válida; verificar a porcentagem de carga restaurada, e se for a melhor já obtida armazenar como a solução incumbente. Ir ao passo iv.
- viii. A carga emergencial está desenergizada?

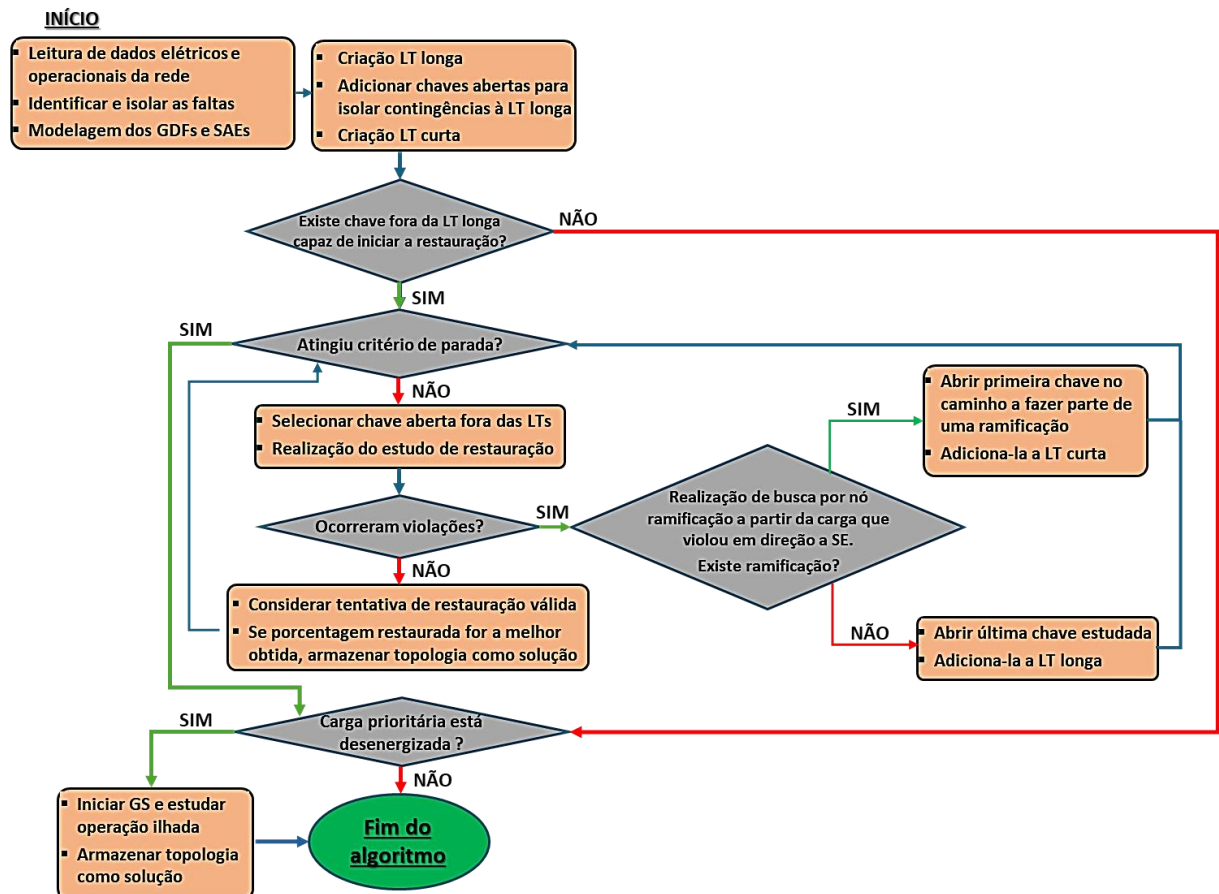
-**Sim:** Iniciar GS e estudar uma ilha possível de se formar dentro dos limites da máquina síncrona (tentativa de restauração de cargas próximas a carga prioritária, sendo o critério menor demanda aparente). Considerar a topologia como solução. Ir ao passo ix (Fim).

-**Não:** Ir ao passo ix (Fim).

- ix. **Fim.**

Na Figura 3 ilustra-se o algoritmo desenvolvido e implementado no MatLab em formato de diagrama de blocos.

Figura 3 - Representação em diagrama de blocos do algoritmo BT



Fonte: Produção do próprio autor.

Durante a execução do algoritmo, cada nova configuração é avaliada por meio do fluxo de potência, assegurando que as restrições físicas e operacionais sejam respeitadas. Assim, o algoritmo considera todas soluções, mas descarta as que violam alguma restrição.

2.6 BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL GERAL

A Busca em Vizinhança Variável Geral (Variable Neighborhood Search – VNS), proposta por Mladenovic e Hansen (Hansen *et al.*, 2010), é uma classe de algoritmos pertencentes às metaheurísticas, que se baseia em mudanças sistemáticas de suas estruturas de vizinhanças nas etapas de intensificação, em que se busca por ótimos

locais, e diversificação, em que se exploram novas regiões do espaço de solução. Na implementação de um algoritmo de VNS as três propriedades devem ser consideradas:

- I. O ótimo local de uma estrutura de vizinhança não é necessariamente o ótimo local das demais estruturas de vizinhança;
- II. O ótimo global é o ótimo local de todas as estruturas de vizinhança possíveis;
- III. Para muitos problemas, os ótimos locais em relação a uma ou mais estruturas de vizinhança estão relativamente próximos um dos outros.

Os algoritmos VNS utilizam a alternância entre diversas estruturas de vizinhança e o emprego de buscas locais para operacionalizar as propriedades 1 e 2. A propriedade 3 sugere que a vizinhança da solução atual seja intensamente explorada (Hansen *et al.*, 2017).

A perturbação atua como o mecanismo de diversificação do algoritmo. Nessa etapa, uma nova estrutura é selecionada aleatoriamente dentro de um espaço de busca vizinho, a partir da solução atual. O objetivo principal desse movimento é deslocar a busca para uma região além dos ótimos locais, permitindo que o algoritmo evite problemas de estagnação e contorne convergências prematuras. Para manter o equilíbrio dinâmico entre a exploração e a diversificação do espaço de estados, utiliza-se um conjunto ordenado de operadores de vizinhança, em que a intensidade e a amplitude da zona de abrangência aumentam progressivamente conforme o algoritmo avança pelas estruturas.

Após a fase de perturbação, o procedimento de melhoria, configurado como uma busca local, é aplicado sobre a solução modificada para refinar o resultado. Esse processo de intensificação foca em encontrar o ótimo local daquela região e adota estratégias clássicas de refinamento: a primeira melhoria (first improvement), que aceita imediatamente a primeira modificação bem-sucedida encontrada, ou a melhor melhoria (best improvement), que explora exaustivamente toda a vizinhança corrente para selecionar o movimento mais otimizado possível.

Por fim, o passo de mudança de vizinhança determina o direcionamento da próxima iteração com base no desempenho obtido. Se a nova solução refinada apresentar um desempenho superior ao da solução atual, o algoritmo atualiza o registro da melhor solução obtida e reinicia o ciclo operacional a partir da primeira estrutura de vizinhança. Caso contrário, se nenhuma melhoria for detectada, o índice

de vizinhança é incrementado, aplicando uma perturbação mais intensa na iteração seguinte para forçar a exploração de novas áreas do sistema.

O GVNS, por sua vez, surge como uma variante avançada e de alto desempenho, em que a fase de busca local simples é substituída pelo procedimento de vizinhança de descida variável (Variable Neighborhood Descent-VND). No GVNS, a intensificação torna-se muito mais rigorosa, pois a VND explora sistematicamente uma sequência de diferentes estruturas de vizinhança para garantir que a solução retornada seja um ótimo local em relação a todas as vizinhanças de busca local estabelecidas.

O VND é um método determinístico de busca local que se baseia na premissa de que um ótimo local em relação a diversas estruturas de vizinhança tem maior probabilidade de ser um ótimo global do que aquele encontrado por uma única vizinhança. Diferente do VNS básico, o VND explora sistematicamente uma sequência de vizinhanças de forma hierárquica. Se uma melhora é detectada em qualquer uma dessas estruturas, o algoritmo retorna imediatamente à primeira vizinhança da lista, reiniciando o processo de busca por soluções melhores a partir da nova solução encontrada. Todo o processo é interrompido se a solução atual não puder ser melhorada em relação a nenhuma das estruturas de vizinhança (Hansen *et al.*, 2017).

O procedimento utiliza estratégias de busca como best improvement para exaurir cada nível de vizinhança antes de avançar para o próximo. A busca encerra-se apenas quando a solução atual atinge um estado de ótimo local em relação a todas as estruturas de vizinhança definidas, garantindo uma intensificação muito mais rigorosa do que uma busca local convencional. Por essa razão, o VND é frequentemente integrado como a fase de melhoria dentro do algoritmo GVNS.

2.7 APLICAÇÃO DO ALGORITMO GVNS NA RESTAURAÇÃO DE REDES

a. Representação e configuração inicial

Representação idêntica a aplicada no algoritmo BT.

b. Estruturas de vizinhanças

Durante a fase de diversificação, 5 critérios de vizinhança são considerados, sendo:

- 1) **Critério de menor demanda relacionada às SEs:** Procura-se a restauração de cargas desenergizadas para o alimentador que está sendo menos solicitado no momento;
- 2) **Critério de menor demanda relacionada às cargas:** Tenta-se a restauração de cargas desenergizadas que apresentem as menores demandas aparentes. Inicia-se considerando o sorteio dentre as 2 cargas de menor demanda do sistema, incrementando-se uma carga ao sorteio realizado nessa estrutura a cada N iterações. Esse parâmetro de incremento pode ser ajustado a depender do sistema para obter melhores resultados, e torna-se útil conforme o avanço no espaço de busca para manter a utilidade desse critério;
- 3) **Critério de proximidade da carga em relação à SE:** Tentativa de restauração de cargas desenergizadas que apresentem as camadas com as menores distâncias em relação à subestação dos alimentadores, verificados pela RNP. Sorteio entre as cargas das duas camadas mais próximas;
- 4) **Critério de redirecionamento de cargas restauradas:** Abertura de uma chave selecionada aleatoriamente para iniciar a iteração, com o propósito de viabilizar a reenergização das cargas dos setores afetados por meio de caminhos alternativos de alimentação na rede de distribuição;
- 5) **Critério de reexploração de ramificações:** Realiza-se a abertura de ramos a jusante em até três ramificações do sistema, permitindo que esses trechos isolados sejam reexplorados detalhadamente pela fase de intensificação;

Durante a fase de intensificação (local search), utilizam-se duas estruturas de vizinhança:

- 1) **Critério de menor demanda relacionada às cargas:** Busca-se a restauração das cargas que apresentam os menores valores de demanda. O número de tentativas ou de cargas avaliadas é parametrizável, permitindo ao algoritmo verificar um número arbitrário de cargas de menor demanda antes de avançar para um critério distinto de intensificação;
- 2) **Critério de transferência de cargas restauradas na iteração atual:** Procura-se a transferência das cargas restauradas na iteração atual por outros circuitos, permitindo assim uma maior exploração do espaço de busca.

c. Critério de parada

O critério de parada interrompe a execução do algoritmo quando se identifica uma estagnação da melhora da função objetivo por 50 iterações consecutivas.

d. Algoritmo GVNS para restauração de redes

A partir da obtenção das informações de entrada fornecidas pelo usuário, executa-se o processo de restauração da rede de distribuição, conforme as etapas descritas a seguir.

- i. Leitura de dados elétricos e parâmetros físicos e de operação do sistema; isolar as faltas; calcular o fluxo de potência pós-falta; definir a topologia inicial como a solução corrente.
- ii. Atingiu-se o critério de parada?
 - Sim:** Ir ao passo viii.
 - Não:** Ir ao passo iii.
- iii. Se o índice da estrutura de diversificação for maior que o limite máximo de vizinhanças estabelecido, reiniciar o índice para a primeira estrutura.
- iv. Foi possível escolher uma nova topologia a ser avaliada, com base na estrutura de diversificação atual?
 - Sim:** Selecionar a nova topologia modificada pela diversificação e ir ao passo v.
 - Não:** Incrementar o índice da estrutura de diversificação e retornar ao passo ii.
- v. A topologia modificada violou alguma das restrições técnicas do sistema?
 - Sim:** Incrementar o índice da estrutura de diversificação e retornar ao passo ii.
 - Não:** Ir ao passo vi.
- vi. Realizar etapa de melhoria VND.
- vii. A solução refinada obtida no passo anterior é superior à solução corrente?
 - Sim:** Atualizar a solução corrente com a nova solução refinada, reiniciar o índice da estrutura de diversificação para a primeira vizinhança e retornar ao passo ii.
 - Não:** Incrementar o índice da estrutura de diversificação e retornar ao passo ii.

viii. A carga emergencial está desenergizada?

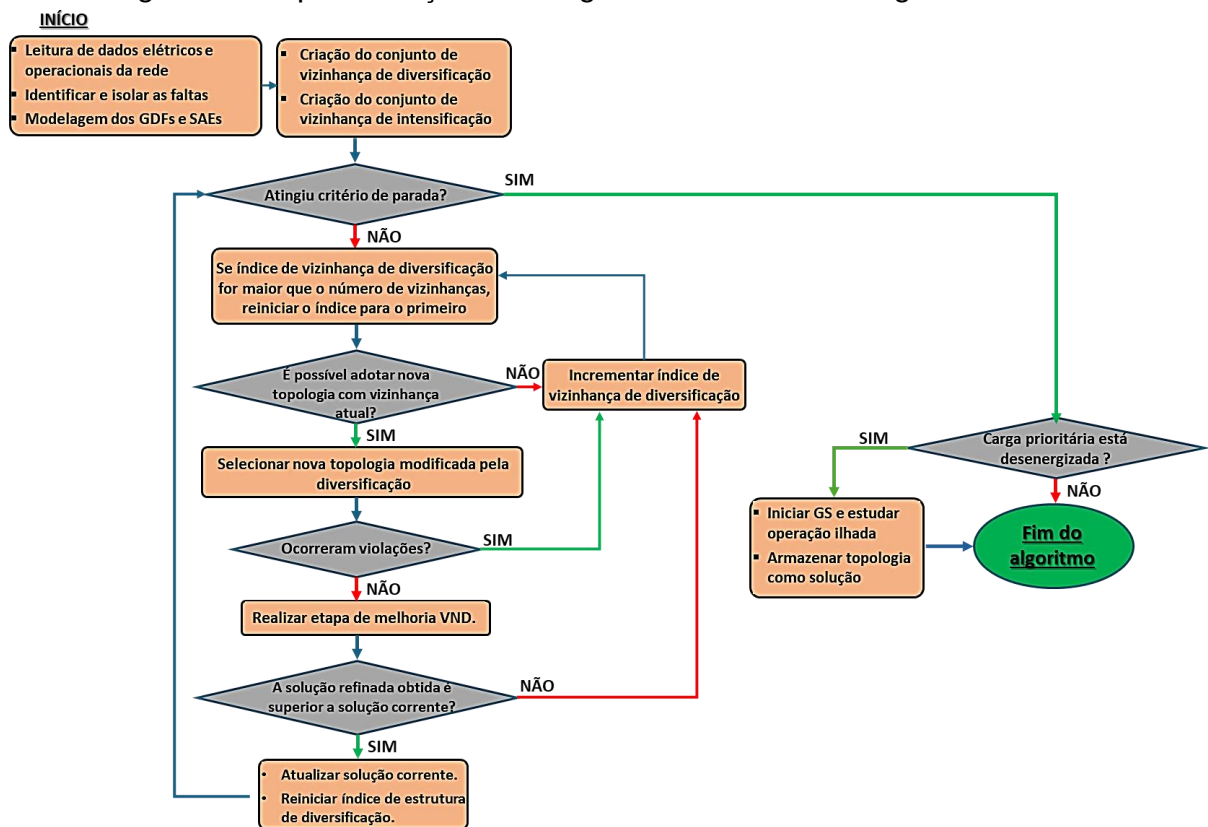
-**Sim:** Colocar em funcionamento o GS e uma possível ilha de cargas a ser alimentada, a qual deve ser composta considerando os limites de capacidade da máquina síncrona. Considerar a topologia como solução. Ir ao passo ix (Fim).

-**Não:** Ir ao passo ix (Fim).

ix. Fim.

Na Figura 4 ilustra-se a metodologia desenvolvida e implementada no MatLab em formato de diagrama de blocos.

Figura 4 - Representação em diagrama de blocos do algoritmo GVNS



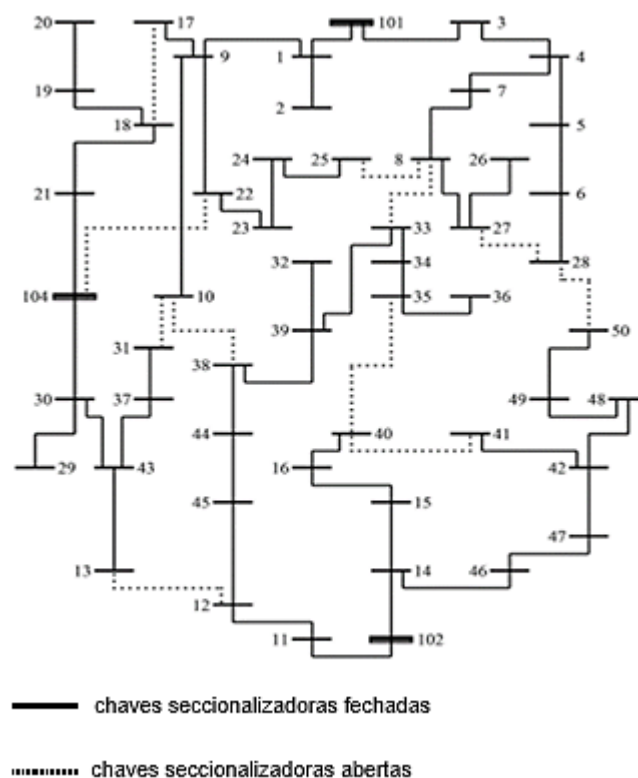
Fonte: Produção do próprio autor.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A metodologia proposta implementada no software MATLAB, é experimentada realizando-se testes em um sistema de 53 nós encontrado na literatura (Romero et

al., 2016). Esse sistema possui 3 subestações e 50 nós de cargas, e, em condições normais, com a topologia inicial do caso base, ilustrada na Figura 5, e sem aplicação de fatores de demanda apresenta uma demanda de potência ativa de 46.668,7 kW e 22.118,24 kVAr de potência reativa. As subestações estão localizadas nos nós 101, 102 e 104. As chaves fechadas são representadas pelas linhas pretas contínuas e as chaves abertas pelas linhas pontilhadas. Testes realizados em AMD Ryzen 5 5600G with Radeon Graphics, 16,0 GB de RAM.

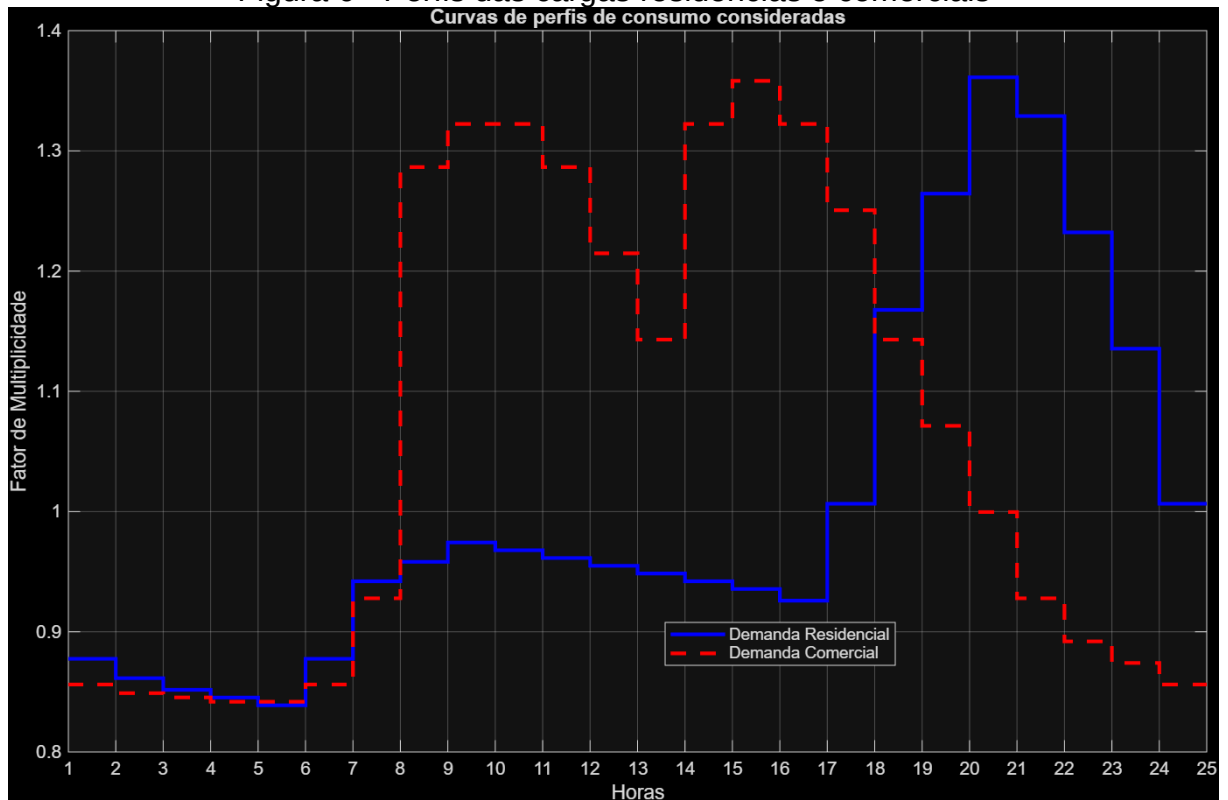
Figura 5 - Topologia inicial do sistema de 53 nós



Fonte. ROMERO, R, *et al.* (2016).

Foram simulados perfis de carga com o objetivo de representar padrões residenciais e comerciais das cargas do sistema. As cargas com numeração de identificação par apresentam perfil de carga residencial, enquanto as cargas com numeração ímpar apresentam perfil de carga comercial. Na Figura 6 apresenta-se o comportamento de cada perfil de carga ao longo das 24 horas do dia, indicando o fator de demanda a ser aplicado à carga nominal em cada intervalo.

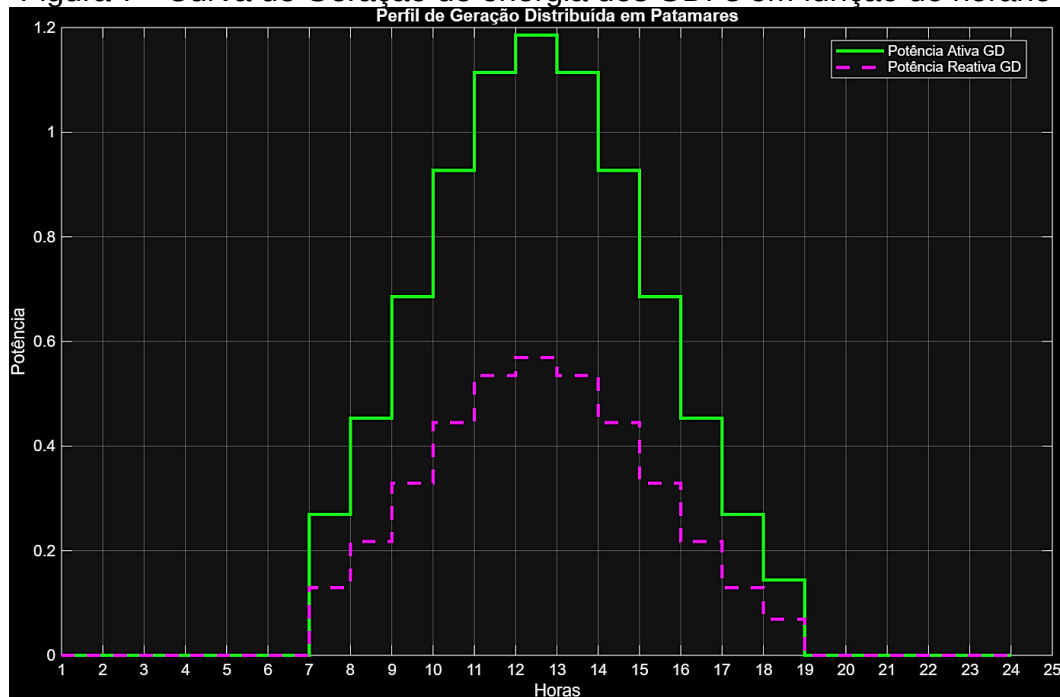
Figura 6 - Perfis das cargas residências e comerciais



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 7 apresenta-se a curva de geração de energia dos GDFs ao longo de 24 horas.

Figura 7 - Curva de Geração de energia dos GDFs em função do horário



Fonte: Produção do próprio autor.

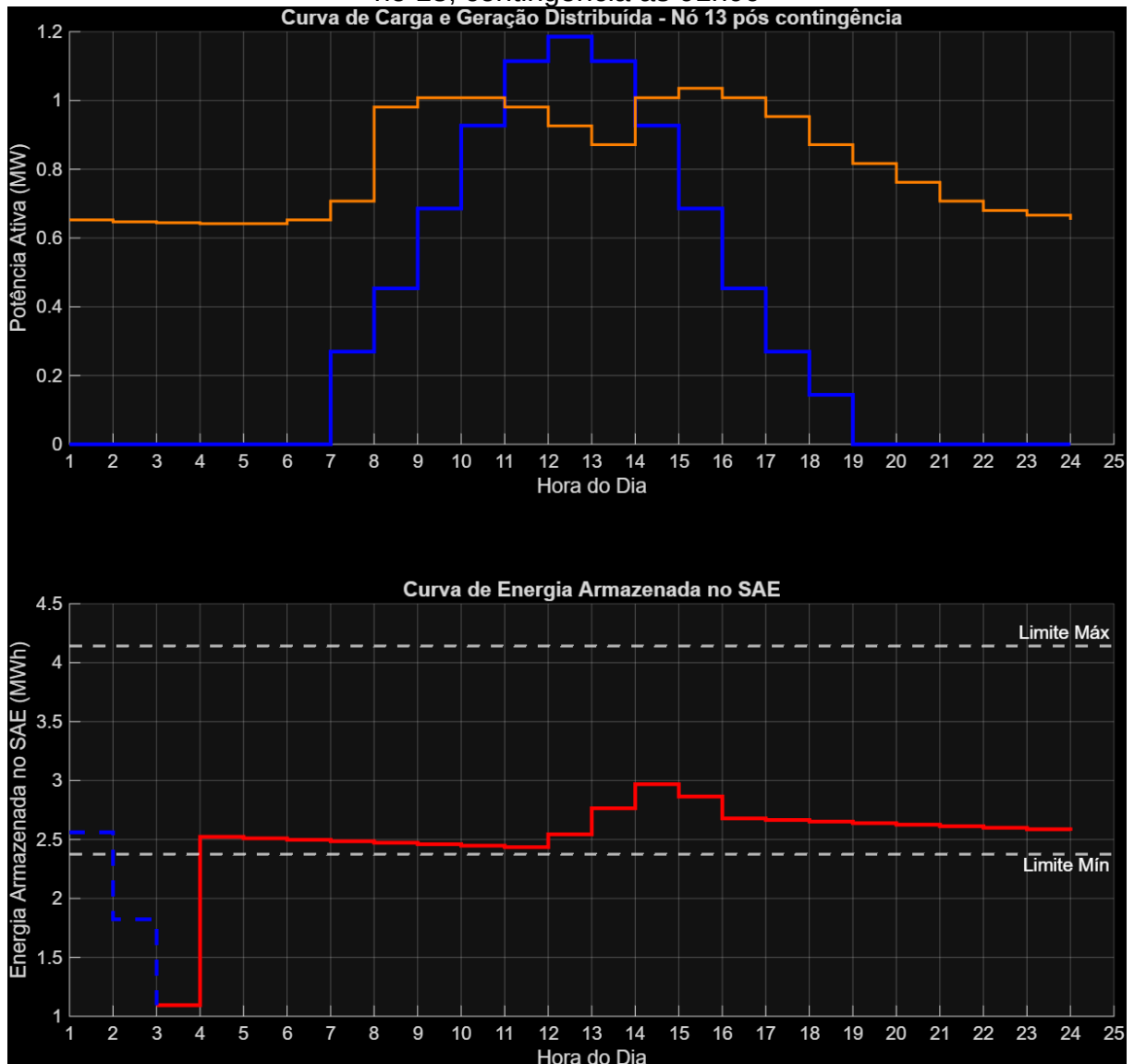
A geração fotovoltaica é padronizada no sistema para os GDFs, sendo considerados os dados das seguintes variáveis:

- Temperatura ambiente: 35° C.
- Tangente do coeficiente de geração de potência reativa: 0,48.
- Potência padrão de uma placa fotovoltaica: 500 W.
- Coeficiente de potência-temperatura: -0,0045.
- Temperatura Nominal de Operação da Placa: 45°C.
- Número de placas: 2000 unidades.

A variação da energia armazenada nos SAEs é determinada pela relação entre geração e demanda locais. Inicialmente no algoritmo, avalia-se se a diferença entre as potências diária gerada e demandada é suficiente para permitir o carregamento da bateria até um nível em que ela seja capaz de suprir integralmente a potência ativa local em qualquer horário do dia, respeitando os limites, capacidade e perdas. Caso essa condição não seja atendida, adota-se um limite inferior de operação correspondente a 15% da capacidade máxima da bateria. Esta capacidade máxima é dimensionada como quatro vezes o valor da maior demanda de potência ativa local, garantindo uma margem de segurança e evitando que o sistema opere em regimes de descarga excessivamente baixos, onde a eficiência da conversão é reduzida. Durante essa etapa, também se calcula o número de dias necessários para que o armazenamento atinja seu respectivo ponto individual de armazenamento mínimo. A partir dessa análise inicial, os SAEs passam a operar de forma estratégica, descarregando nos períodos de maior demanda para atenuar os picos de consumo, de acordo com o perfil de carga característico do nó em que estão conectados.

Na Figura 8 apresenta-se um exemplo do comportamento do SAE quando alocado no nó 13 e a relação de potência ativa gerada no GDF, curva de carga do nó em que está instalado e o armazenamento de energia nos SAEs, todos em função do horário do dia. Na curva do SAE, o período em azul pontilhado mostra como a bateria se comporta durante a falta, com horário da contingência às 01h00, fora do período de geração do GDF, e, portanto, não auxilia no suprimento da carga local. Para que o estado da bateria seja suficiente para suprir totalmente a demanda de potência ativa da carga a qualquer período do dia, são dedicados 8 dias, apenas para o seu carregamento.

Figura 8 - Relação entre curva de carga, geração e armazenamento de energia no nó 13, contingência às 01h00



Fonte: Produção do próprio autor.

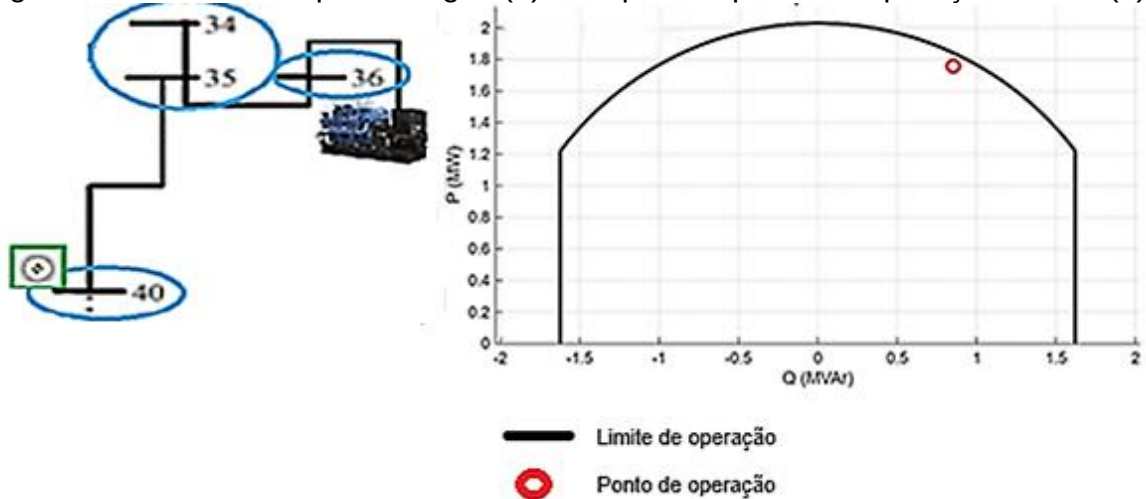
A alocação do GS é singular no sistema, instalada junto a uma carga de natureza emergencial, ou seja, local onde não pode ocorrer a interrupção do fornecimento de energia elétrica. O GS fornece energia se a carga em que está instalado não for restaurada na topologia que é a solução fornecida pelo algoritmo. A limitação superior da curva de capacidade considerada é 2 vezes a média das demandas aparentes das cargas nominais do sistema (valor empírico capaz de abastecer a maior parte das cargas do sistema de forma ilhada).

No caso de ser necessária a atuação do GS no serviço de restauração, um algoritmo explora a vizinhança em busca de cargas próximas que também possam se

beneficiar dessa geração, sem violar nenhum limite físico ou operacional previamente estabelecido. O critério de escolha dessas cargas próximas é através da menor demanda aparente, visando a restauração de uma maior quantidade de consumidores.

Nas Figuras 9 e 10 apresentam-se 2 pontos de operação distintos para 2 ilhas formadas.

Figura 9 - Ilha formada por 4 cargas (a) e respectivo ponto de operação do GS (b)

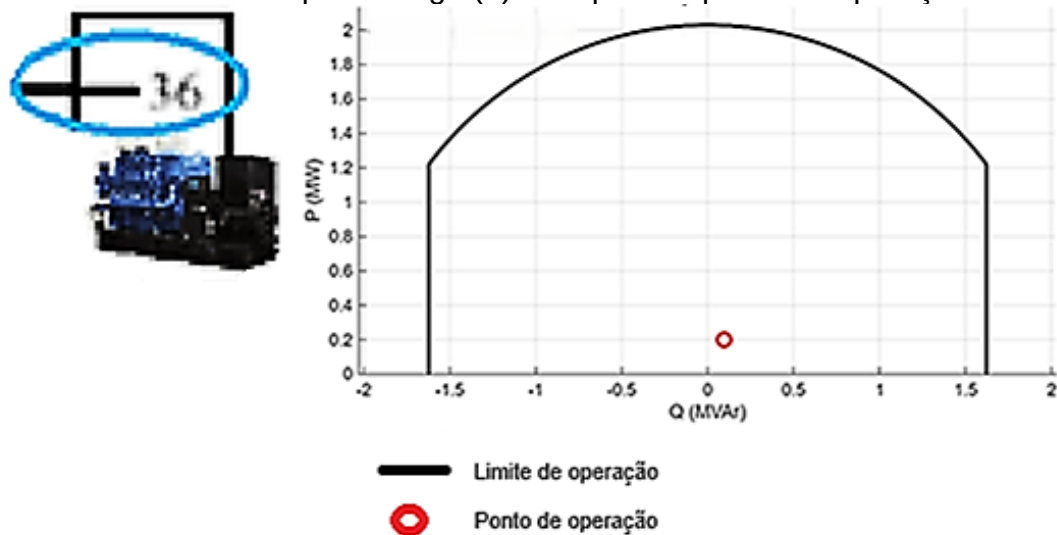


(a)

(b)

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 10 - Ilha formada por 1 carga (a) e respectivo ponto de operação do GS (b)



(a)

(b)

Fonte: Produção do próprio autor.

As restrições físicas do sistema são limites de magnitudes de tensões mínima e máxima em cada nó, limites térmicos individuais nos ramos e limites de fornecimento individuais para cada subestação. Para as tensões, os limites mínimo e máximo das magnitudes são 0,95 e 1,05 p.u, respectivamente, sendo a tensão nominal do sistema 13,8 kV. Os limites térmicos em cada ramo são apresentados no Apêndice A, que representa as conexões entre os nós de forma matricial e a capacidade máxima de corrente em todos os condutores. As subestações 101, 102 e 104 possuem limite de fornecimento de 33.400 kVA, 30.000 kVA e 22.000 kVA, respectivamente. A restrição operacional consiste em obter uma solução que apresente topologia radial.

A avaliação do desempenho dos algoritmos propostos fundamenta-se nas simulações de faltas no sistema de distribuição apresentado na Figura 5. A eficácia dos algoritmos é analisada em quatro patamares temporais distintos (08h, 11h, 19h e 01h) de modo a contemplar as variações cíclicas da demanda e a disponibilidade de geração renovável ao longo de um ciclo operativo; e através da relação entre essas duas curvas determinar o comportamento dos armazenadores de energia. Para cada um desses cenários temporais, conduz-se uma análise comparativa estruturada em três configurações progressivas de rede, iniciando pelo sistema base operando de forma convencional, seguido pela inserção de GDF e SAE, e com a associação desses recursos à possibilidade de operação ilhada para o atendimento de uma carga emergencial. São avaliados três cenários de faltas com complexidade crescente. O primeiro cenário envolve uma falta simples no nó 3, enquanto os demais simulam contingências múltiplas localizadas simultaneamente nos nós 11 e 14, e de forma ainda mais crítica nos nós 11, 14 e 21. Essa seleção estratégica de cenários de faltas visa validar a capacidade das metaheurísticas em identificar topologias viáveis sob condições distintas de contingências, onde a topografia da rede e as restrições físicas e operacionais exigem uma exploração exaustiva e diversificada do espaço de busca.

Nas Tabelas 1, 2 e 3 são apresentadas as soluções obtidas pelos algoritmos desenvolvidos, acompanhadas do tempo médio de processamento demandado para cada cenário (calculado a partir de 10 iterações). Para a metaheurística GVNS, que incorpora uma componente estocástica em sua formulação, também são detalhados os diferentes resultados obtidos e suas respectivas probabilidades de ocorrência (para estas análises, a simulação de cada cenário foi realizada 10 vezes).

3.1 FALTA NO NÓ 3

Apresenta-se na Tabela 1 os resultados obtidos para falta no nó 3 para ambos algoritmos desenvolvidos.

Tabela 1 - Resultados de restauração para contingência no nó 3.

Falta em 3						
Horários	Configuração	Cargas restauradas BT	Tempo médio BT (s)	Cargas restauradas GVNS	Probabilidade Sol.	Tempo médio GVNS (s)
08h00	caso base	25%	15,1	25%	100%	13,8
	GDF + SAE	50%	26,7	50%	100%	12,2
	GDF + SAE + G.S	62,5%	27,3	62,5%	100%	20,2
11h00	caso base	25%	15,4	25%	100%	13,5
	GDF + SAE	62,5%	19,5	50%	100%	19,60
	GDF + SAE + G.S	62,5%	18,7	75,0%	100%	20
19h00	caso base	12,5%	10,2	12,5%	100%	9,4
	GDF + SAE	37,5%	22,6	37,5%	100%	16,8
	GDF + SAE + G.S	62,5%	23,4	62,5%	100%	17,9
01h00	caso base	50%	19,2	62,5%	100%	26,1
	GDF + SAE	62,5%	13,8	62,5%	100%	26,3
	GDF + SAE + G.S	75%	13,9	75%	100%	23,9

Fonte: Produção do próprio autor.

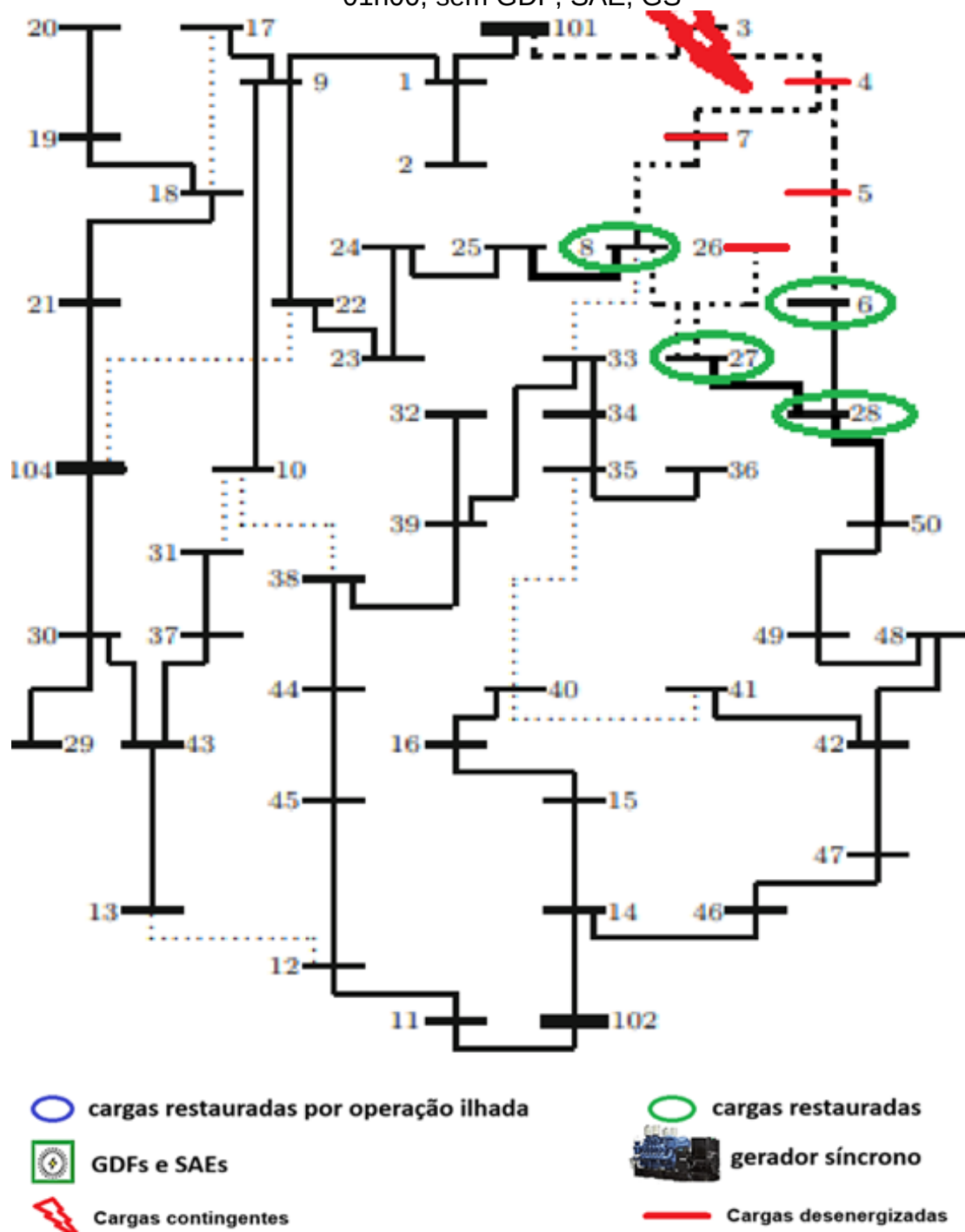
Alocação dos GDFs e SAEs nos nós 25, 50, 31 e 8, e de GS no nó 4.

A análise dos resultados obtidos para a contingência no nó 3 demonstra que ambos os algoritmos implementados apresentaram um desempenho robusto e eficaz na resolução do problema de restauração. Observa-se que as duas técnicas foram capazes de convergir para soluções viáveis e de qualidade em todos os cenários estudados, garantindo a operacionalidade do sistema dentro dos limites e restrições estabelecidas.

Verifica-se um avanço qualitativo nos índices de restauração à medida que o sistema deixa de operar de forma convencional (caso base) e passa a incorporar a GDFs e os SAEs. Verifica-se também que os resultados alcançados não são os mesmos para todos os casos, como, por exemplo, às 11h00 com GDFs e SAEs, em que a BT foi superior em eficiência computacional, enquanto que após a inserção do GS o algoritmo GVNS superou a eficiência da BT.

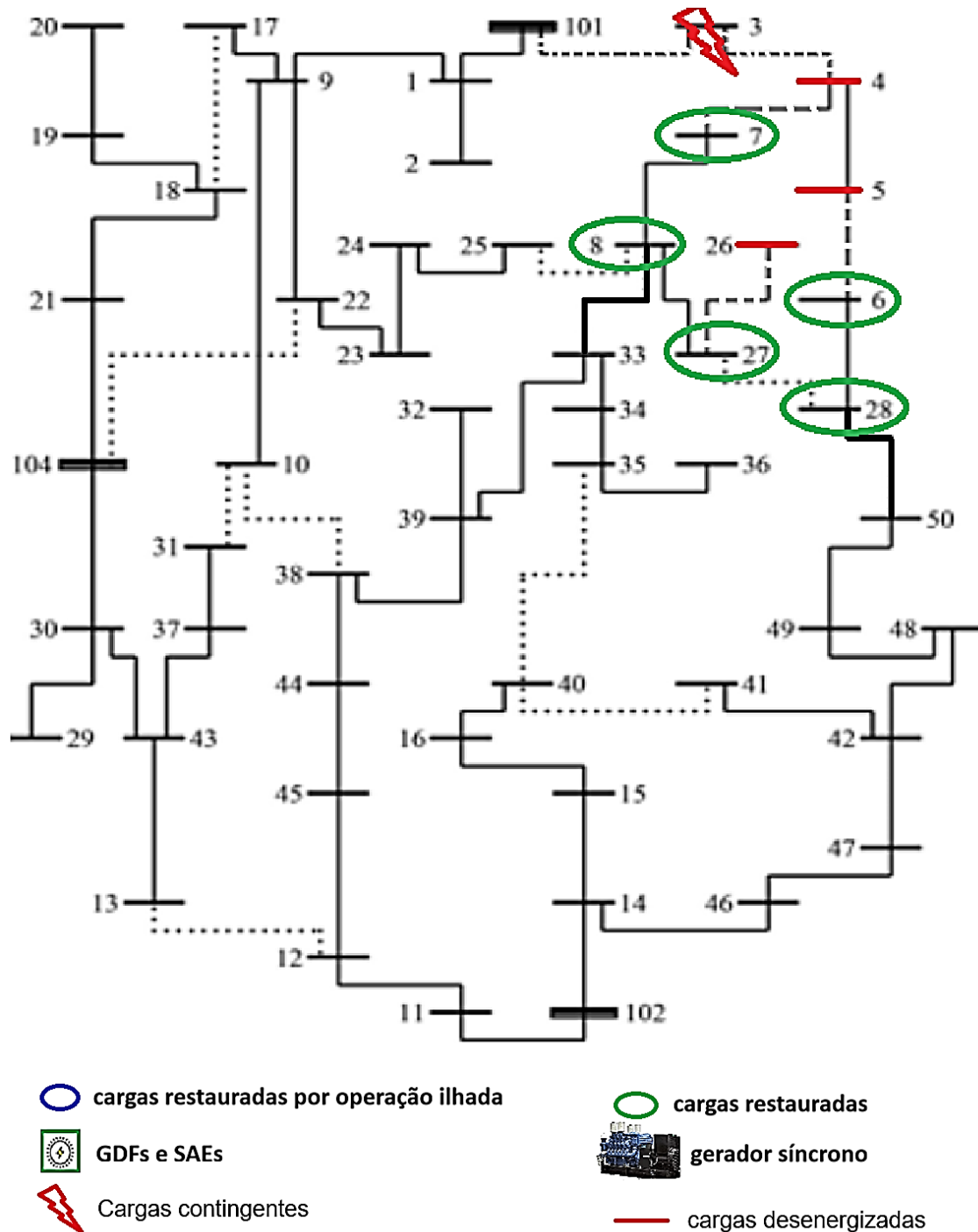
A seguir destaca-se o cenário particular de falta no nó 3 às 01h00 para uma análise detalhada. Nas Figuras 11, 12, 13, 14, 15 e 16 demonstra-se a evolução da topologia solução conforme a inserção dos GDFs, SAEs e GS, para o cenário de falta no nó 3 à 01h00, para ambos os algoritmos.

Figura 11 - Topologia da solução encontrada pela BT para contingência no nó 3 às 01h00, sem GDF, SAE, GS



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 12 - Topologia da solução encontrada por GVNS para contingência no nó 3 às 01h00, sem GDF, SAE, GS

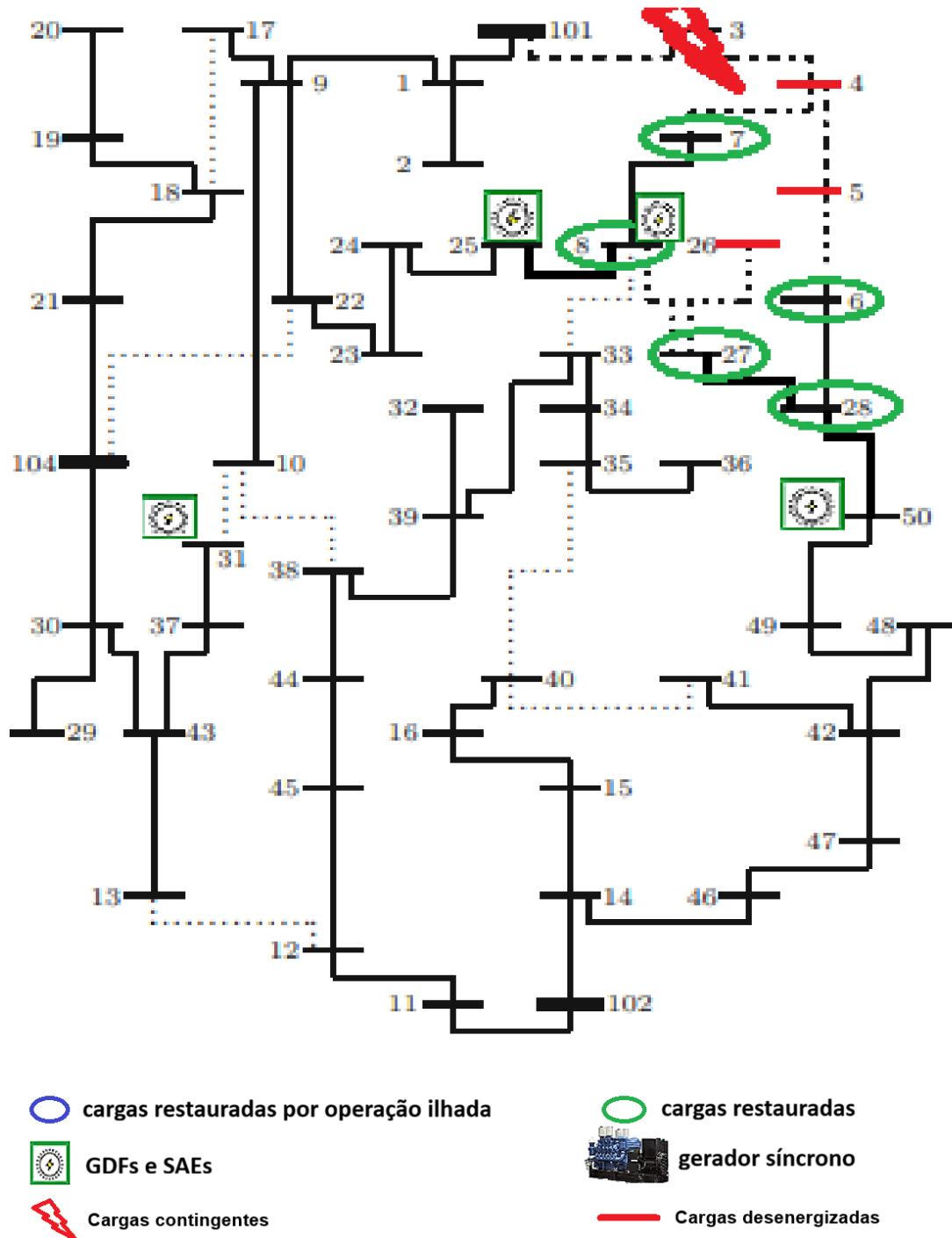


Fonte: Produção do próprio autor.

Para BT, no cenário apresentado na Figura 11 foram restauradas 4 cargas das 8 que foram atingidas pela falta (50% das cargas), sendo 4 cargas através de reconfiguração topológica, enquanto para GVNS apresentado na Figura 12 foram

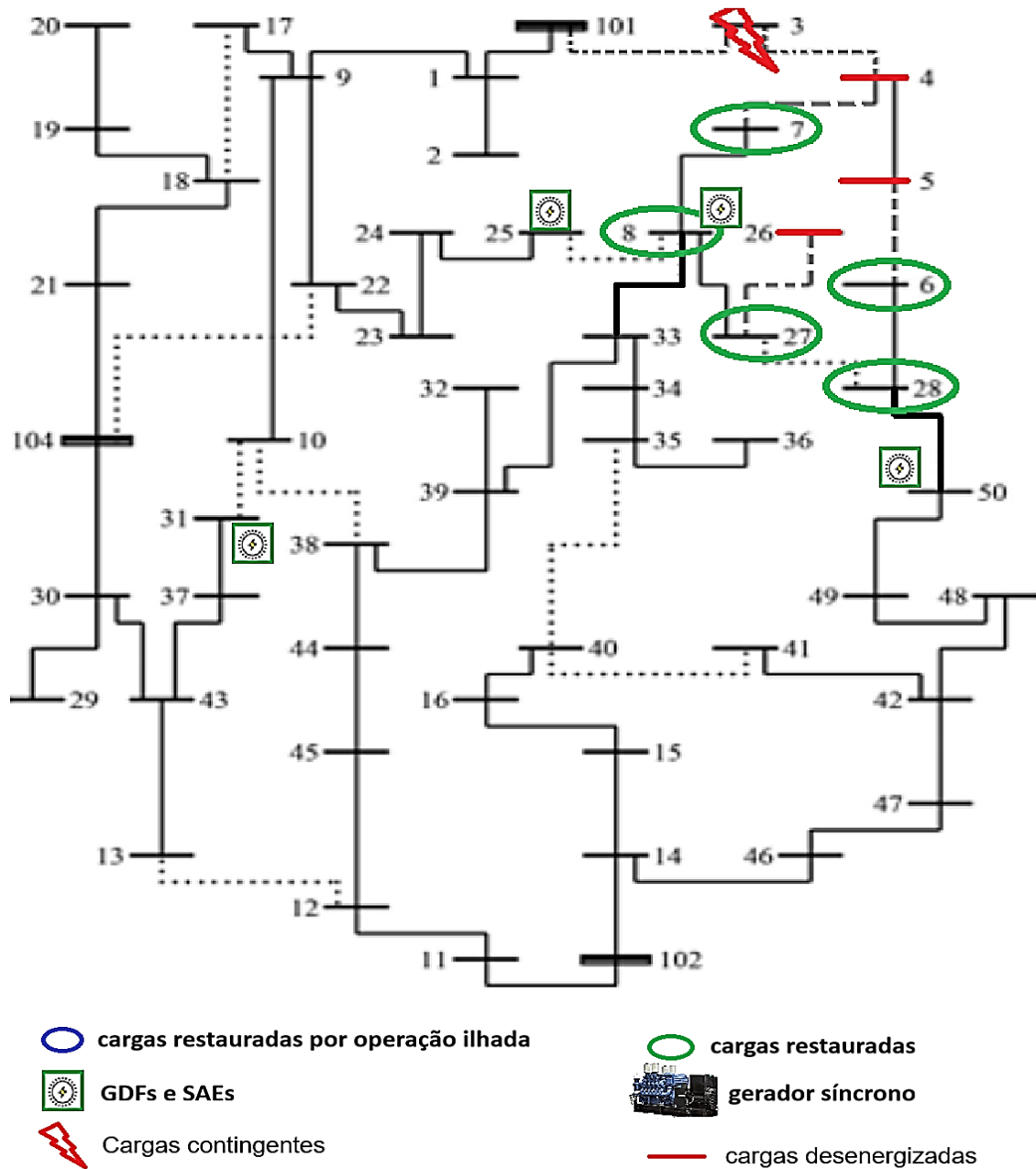
restauradas 5 cargas das 8 que foram atingidas (62,5% das cargas), sendo cinco cargas através de reconfiguração topológica.

Figura 13 - Topologia da solução fornecida pelo BT para contingência no nó 3 às 01h00, com GDFs e SAEs



Fonte: Produção do próprio autor.

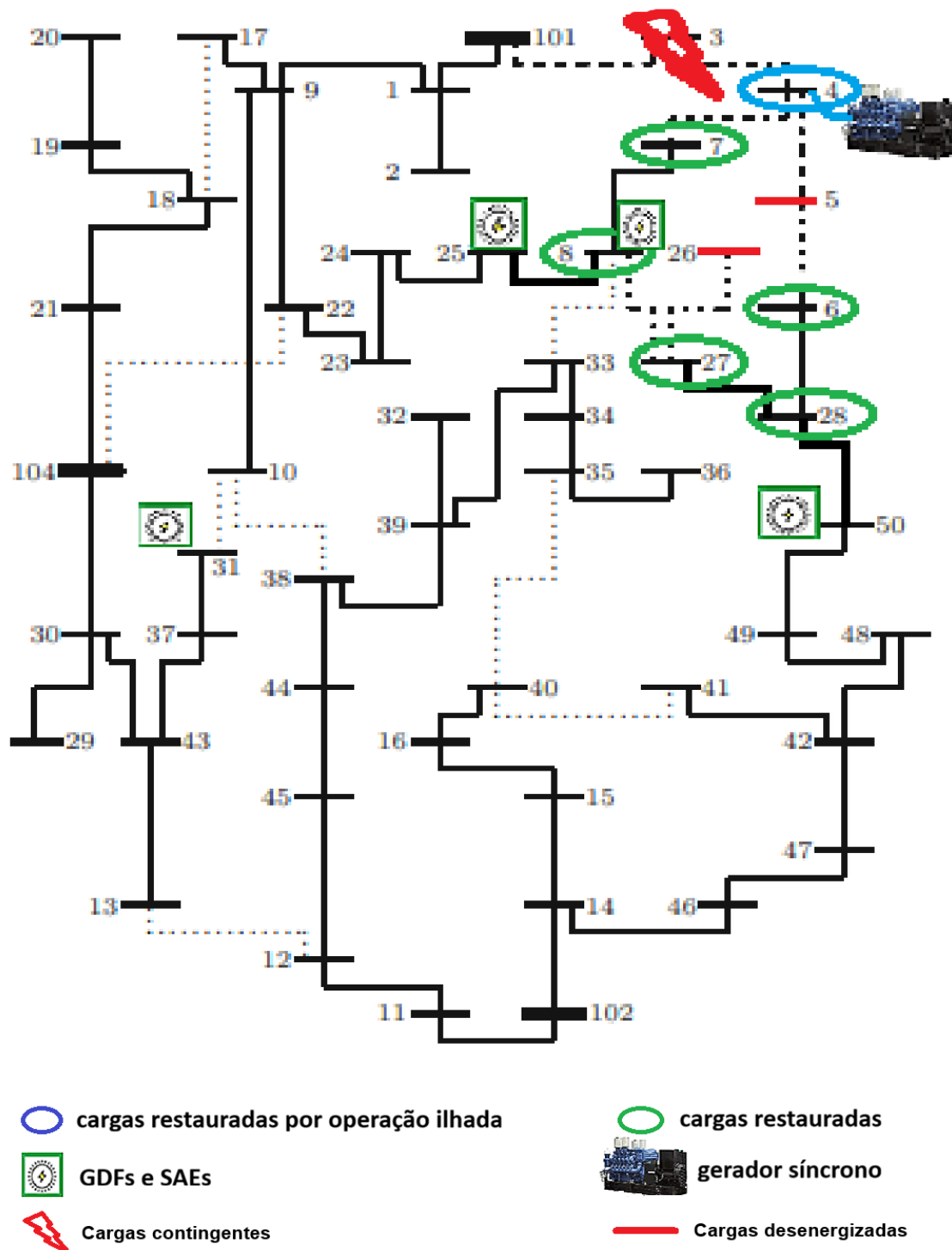
Figura 14 - Topologia da solução fornecida pelo GVNS para contingência no nó 3 às 01h00, com GDFs e SAEs



Fonte: Produção do próprio autor.

Para ambos algoritmos, no cenário apresentado nas Figuras 13 e 14 foram restauradas 5 cargas das 8 que foram afetadas (62,5% das cargas afetadas), sendo 5 cargas através de reconfiguração topológica. Os resultados obtidos na função-objetivo foram iguais para ambas as metodologias, porém, com topologias soluções diferentes, evidenciando que mesmo em cenários em que “poucas” cargas são afetadas, o espaço de busca continua sendo complexo.

Figura 15 - Topologia da solução fornecida pelo BT para contingência no nó 3 às 01h00, com GDFs, SAEs e operação ilhada via GS

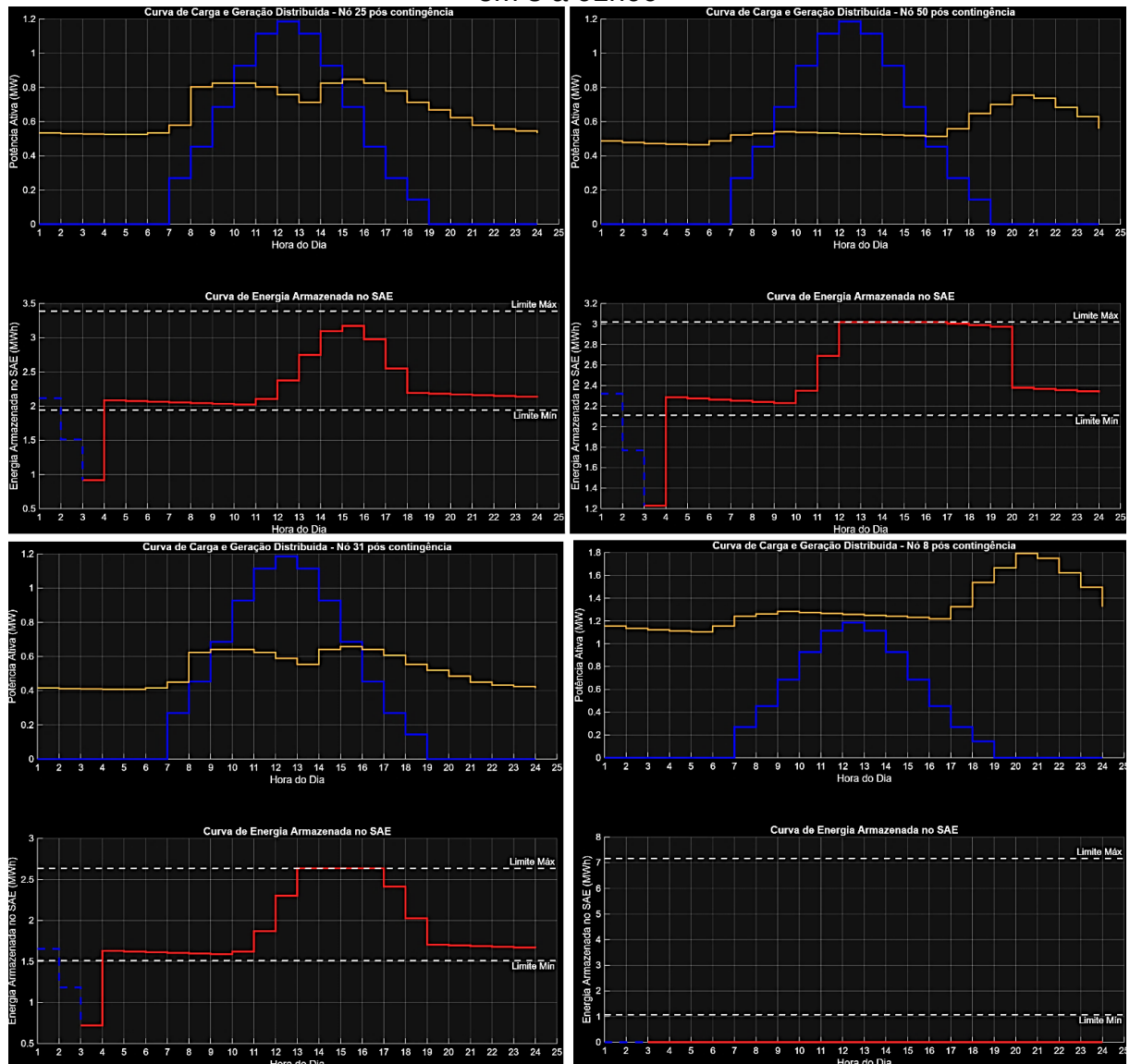


Fonte: Produção do próprio autor.

ilhada via GS. Resultados da função objetivo iguais para ambas as metodologias, porém, com topologias soluções diferentes.

Na Figura 17 apresentam-se os comportamentos das alocações de GDFs e SAEs nos nós 25, 50, 31 e 8.

Figura 17 - Comportamento dos GDFs e SAEs nos nós 25, 50, 31 e 8 durante falta em 3 à 01h00

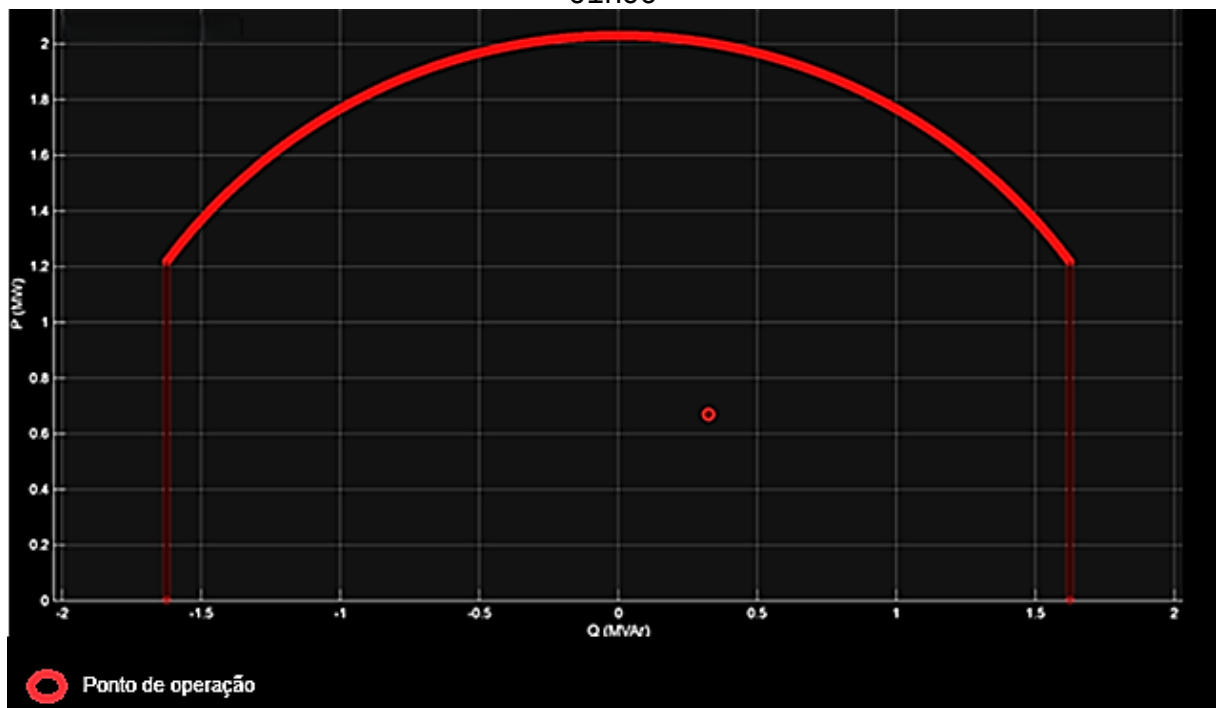


Fonte: Produção do próprio autor.

O comportamento dinâmico das alocações durante a contingência à 01h00 revela a importância estratégica da integração desse tipo de tecnologia para a resiliência da rede. No período de duas horas de falta, os gráficos de energia armazenada nos nós 25, 50 e 31 apresentam um descarregamento imediato, identificado pelo trecho em azul nas curvas de energia armazenada no SAE, que atua

como fonte de potência ativa local. Como a geração fotovoltaica é nula nesse horário, o suporte das baterias isoladamente permite elevar o índice de restauração de 50% para 62,5% na BT, garantindo um maior atendimento às cargas até que o funcionamento normal da rede seja reestabelecido. Em contraste, com a alocação do SAE no nó 8, observa-se um comportamento diferente dos demais nós de alocação, uma vez que a curva de geração fotovoltaica (linha azul) em nenhum momento do dia supera a curva da demanda local (linha laranja). Devido a essa insuficiência de excedente energético para o processo de carga, o SAE deste nó permaneceu com nível de carga nulo durante todo o período avaliado. Consequentemente, o SAE não dispõe de reserva para atuar durante a contingência ocorrida à 01h00, o que representa a ausência de contribuição local. A consolidação dos melhores índices de restauração para o cenário da 01h00 é atingida com a inserção estratégica do GS, que eleva a capacidade de recomposição da rede para 75% das cargas em ambos os algoritmos, no mesmo cenário anteriormente avaliado. Na Figura 18 apresenta-se o estado do gerador síncrono com falta no nó 3 à 01h00, restaurando apenas a carga emergencial 4.

Figura 18 - Comportamento do gerador síncrono alocado no nó 4, falta no nó 3 à 01h00



Fonte: Produção do próprio autor.

Essa evolução é fundamentada na capacidade do GS para fornecer suporte de potência total, independentemente das condições climáticas ou do estado de carga

das baterias. Como evidenciado na curva de capacidade do GS, o ponto de operação do sistema durante a contingência (marcado pelo círculo vermelho) situa-se plenamente dentro dos limites nominais de potência ativa (P) e reativa (Q) considerados para a máquina. Essa folga operativa demonstra que o gerador atuou de forma segura e estável, sendo capaz de suprir integralmente a demanda emergencial planejada para aquele trecho da microrrede sem violar as restrições técnicas de estabilidade e aquecimento.

Quanto ao esforço computacional, a BT apresentou tempos variando entre 10,2s e 27,3s, e o tempo médio considerando todas as médias para cada cenário foi de 18,1s. O GVNS, por sua vez, apresentou tempos variando entre 9,4s e 26,3s, e o tempo médio considerando todas as médias para cada cenário foi de 18,3; ambos igualmente eficientes com relação ao esforço computacional nesse caso.

3.2 FALTA NOS NÓS 11 E 14

Na Tabela 2 apresentam-se os resultados comparativos para falta nos nós 11 e 14.

Tabela 2 - Resultados de restauração para contingências nos nós 11 e 14.

Falta em 11 e 14						
Horarios	Configuração	Cargas restauradas BT	Tempo médio BT (s)	Cargas restauradas GVNS	Probabilidade Sol.	Tempo médio GVNS (s)
08h00	caso base	20%	14,5	20%	100%	15,5
	GDF + SAE	35%	15,1	35%	100%	20,6
	GDF + SAE + G.S	45%	17,2	40% e 45%	90% e 10%	20,1
11h00	caso base	20%	14,2	20%	100%	16,3
	GDF + SAE	40%	13,5	40%	100%	22,6
	GDF + SAE + G.S	50%	12,5	50%	100%	23,9
19h00	caso base	20%	14,1	20%	100%	15,8
	GDF + SAE	25%	13,6	25%	100%	15,6
	GDF + SAE + G.S	35%	11,9	35%	100%	16,6
01h00	caso base	70%	32,9	70% e 65%	60% e 40%	30,8
	GDF + SAE	70%	32,2	75% e 70%	80% e 20%	36,4
	GDF + SAE + G.S	70%	28,3	75% e 70%	80% e 20%	33

Fonte: Produção do próprio autor.

Alocação dos GDFs e SAEs nos nós 10, 13 e 12, e de GS no nó 36.

A análise dos resultados apresentados na Tabela 2, referente às contingências simultâneas nos nós 11 e 14, ressalta a eficácia das metaheurísticas em cenários de maior complexidade e a importância da inserção das tecnologias consideradas para aumentar a quantidade de cargas restauradas. No patamar das 11h00, por exemplo, o índice de restauração eleva-se de 20% no caso base para 40% com a integração

de GDF e SAE. Com a inclusão do GS, atinge-se 50% de atendimento na BT e GVNS, o que comprova o benefício da formação de microrredes para o suporte a cargas emergenciais, gerações distribuídas e armazenamentos locais.

Um aspecto relevante do desempenho do algoritmo GVNS refere-se à natureza estocástica da etapa de shaking (diversificação) que, ao explorar diferentes estruturas de vizinhança, pode fornecer resultados distintos para um mesmo cenário. Esse fenômeno é observado no cenário das 08h00 (GDF + SAE + GS), onde o algoritmo apresentou dualidade de soluções: em 90% das iterações, o GVNS convergiu para uma restauração de 45% das cargas isoladas, enquanto em 10% das execuções a solução encontrada foi de 40%. Essa variação evidencia a importância de análises probabilísticas para a avaliação de algoritmos com essas características.

Observa-se também o mesmo fenômeno no cenário da 01h00 para todas configurações. Nesse horário, o algoritmo GVNS apresentou duas soluções possíveis. Na configuração base, apresentou valores de 65% e 70% das cargas restauradas com probabilidades de ocorrência de 40% e 60%, respectivamente, demonstrando que a etapa de shaking permitiu ao GVNS atingir o mesmo patamar do BT (que permaneceu estável em 70%) em uma parcela das iterações. Ao considerar a operação de GDFs e SAEs, observa-se uma variação nos resultados obtidos de 75% e 70% das cargas restauradas com probabilidades de 80% e 20%, respectivamente, e, portanto, nesse cenário o shaking permitiu o GVNS superar o valor obtido pelo BT em uma parcela das iterações.

Com relação à eficiência computacional, a Busca Tabu apresentou tempos de processamento menores, consolidando-se como uma ferramenta ágil, enquanto o GVNS, embora mais custoso em termos de tempo, demonstrou uma capacidade de exploração do espaço de busca ligeiramente superior em cenários específicos. Para BT os tempos variaram entre 11,9s e 32,9 com média de 18,33s, enquanto para o GVNS os tempos ficaram entre 15,5s e 36,4s com média de 22,3s.

3.3 FALTA NOS NÓS 11, 14 E 21

Na Tabela 3 apresentam-se os resultados comparativos para faltas simultâneas nos nós 11, 14 e 21.

Tabela 3 - Resultados de restauração para contingências nos nós 11, 14 e 21.

Falta em 11, 14 e 21						
Horários	Configuração	Cargas restauradas BT	Tempo médio BT (s)	Cargas restauradas GVNS	Probabilidade Sol.	Tempo médio GVNS (s)
08h00	caso base	17%	16,6	17%	100%	18,1
	GDF + SAE	30%	16,4	30%	100%	20,6
	GDF + SAE + G.S	39%	20,9	39%	100%	20,1
11h00	caso base	22%	15,8	22% e 17%	90% e 10%	17,8
	GDF + SAE	30%	15,6	30% e 26%	90% e 10%	20,9
	GDF + SAE + G.S	39%	20,6	39%	100%	18,8
19h00	caso base	17%	16,5	17%	100%	15,9
	GDF + SAE	26%	19,7	26% e 22%	90% e 10%	23,6
	GDF + SAE + G.S	34%	31,5	34%	100%	23,4
01h00	caso base	74%	30,5	74% e 69%	80% e 20%	30,9
	GDF + SAE	78%	29,8	78% e 74%	80% e 20%	24,6
	GDF + SAE + G.S	78%	29,1	78% e 74%	90% e 10%	34,9

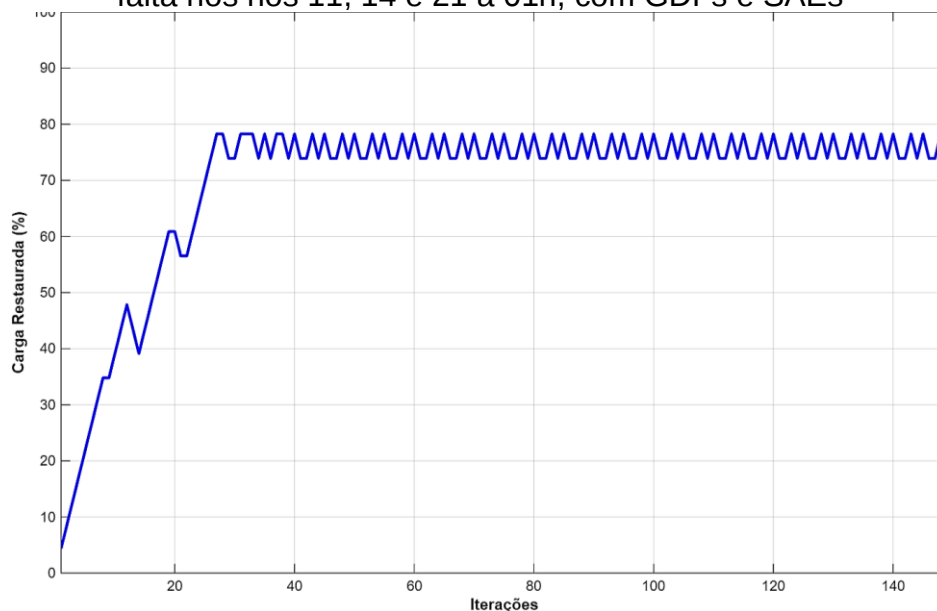
Fonte: Produção do próprio autor.

Alocação dos GDFs e SAEs nos nós 17, 13 e 12, e de GS no nó 36.

Nesse cenário o algoritmo baseado em BT apresentou tempos médios de execução entre 15,6s e 31,5s, demonstrando eficiência computacional para a resolução do problema de restauração. Devido à sua natureza determinística, o algoritmo apresentou consistência nos resultados, obtendo soluções de alta qualidade em todos os casos analisados. A variação observada no tempo de processamento está principalmente relacionada à operação do GS, que eleva o tempo de execução do programa devido à necessidade de validar restrições adicionais, como a avaliação da curva de capacidade e restrições operacionais que devem ser respeitadas pela ilha formada. Além disso, o esforço computacional é ampliado em situações de faltas críticas (como a contingência múltipla nos nós 11, 14 e 21), especialmente em horários de baixa demanda (ex: 01h00). Devido à baixa demanda geral da rede nesses períodos, tem-se maior folga nos limites térmicos dos condutores e nos perfis de tensão, expandindo consideravelmente o espaço de busca e permitindo que o algoritmo explore um número muito superior de combinações de manobras e remanejamento de cargas para maximizar as cargas a serem restauradas. A implementação das LT curta duração mostrou-se, portanto, eficiente, permitindo ao algoritmo BT não ficar estagnado em soluções de ótimos locais ao atuar estrategicamente nas ramificações restauradas e guiando a busca para novas topologias enquanto a LT longa duração garantiu a diversificação da busca, mitigando a ciclagem bem como a reexploração de regiões do espaço de busca não promissoras.

Na Figura 19 é apresentado o gráfico de porcentagem de carga restaurada vs. iteração do algoritmo BT, para falta nos nós 11, 14 e 21, à 1h00, sistema com instalação de GDFs e SAEs.

Figura 19 - Evolução da solução corrente do algoritmo BT ao longo das iterações, falta nos nós 11, 14 e 21 à 01h, com GDFs e SAEs



Fonte: Produção do próprio autor.

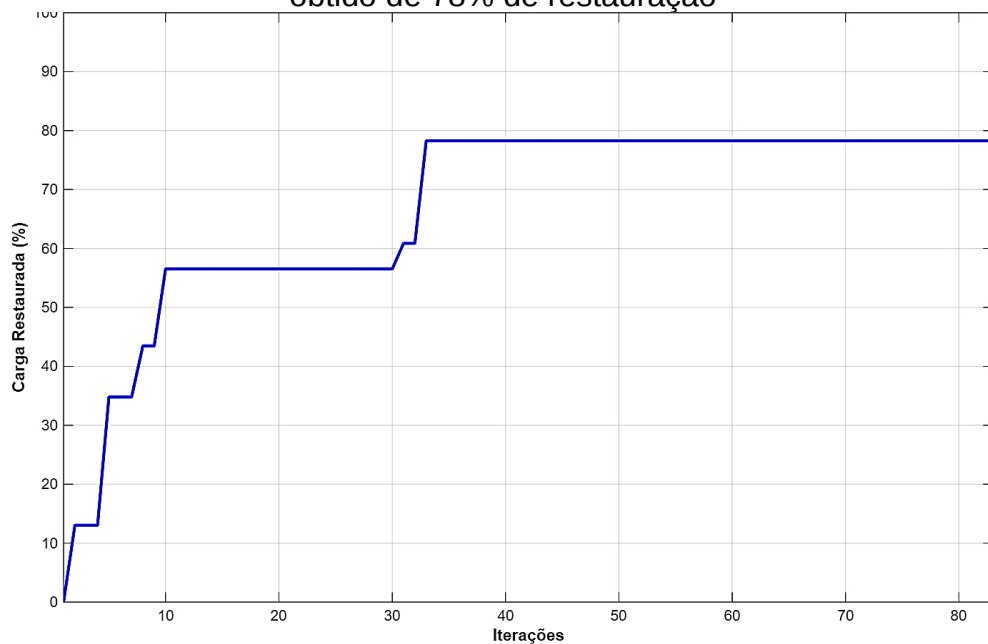
Analisando o gráfico, verifica-se uma fase inicial de intensificação acentuada até aproximadamente a iteração 30. Nesse período, o algoritmo realiza buscas locais sucessivas, elevando rapidamente o índice de carga restaurada conforme identifica manobras de chaveamento que respeitem as restrições de tensão, corrente e abastecimento do sistema. É possível observar pequenas quedas pontuais na porcentagem de restauração (como as ocorridas próximas às iterações 15 e 20); esses movimentos representam a aceitação estratégica de soluções piores pelo algoritmo. Essa característica é fundamental para que o algoritmo deixe soluções ótimas locais, permitindo que a busca explore novas regiões do espaço de soluções que poderiam estar bloqueadas por um movimento que tenha sido realizado anteriormente.

A partir da iteração 30, o algoritmo atinge o patamar de 78% de restauração, iniciando um comportamento de oscilação em formato de serra. Esse fenômeno é resultado direto da atuação da Lista Tabu, forçando o algoritmo a realizar manobras que degradam temporariamente a solução na tentativa de melhorar a solução atual, e proibindo certos movimentos. Essa oscilação permanente demonstra que o algoritmo segue explorando o espaço de busca exaustivamente até que se atinja o critério de parada.

A metaheurística GVNS apresentou tempos de execução situados entre 15,9 s e 34,9s, com média geral de 22,5s. Verifica-se que o GVNS foi capaz de atingir todos os patamares de carga restaurada obtidos pela Busca Tabu.

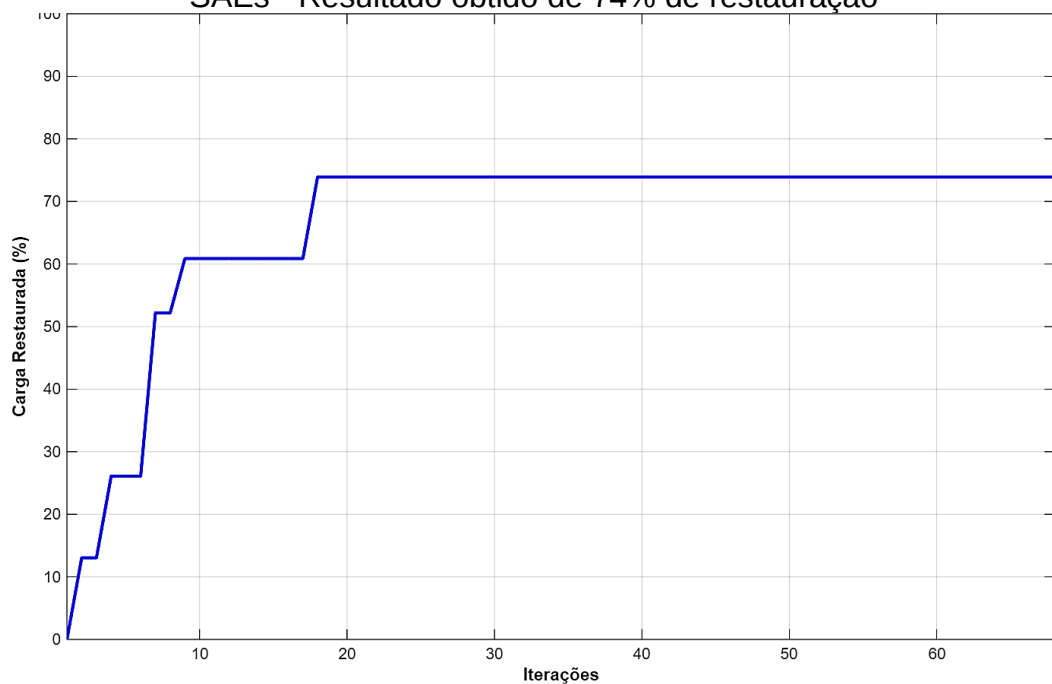
Nas Figuras 20 e 21 são apresentados os gráficos de porcentagem de carga restaurada vs. iteração do algoritmo GVNS, para faltas nos nós 11, 14 e 21, à 1h00, para o sistema operando com GDFs e SAEs instalados. Como durante as coletas de dados o algoritmo apresentou duas soluções, apresentam-se dois gráficos, nos quais o primeiro foi em uma execução capaz de atingir 78% de restauração, e o segundo, 74% de restauração das cargas.

Figura 20 - Evolução da solução corrente do algoritmo GVNS por iteração - Falta simultânea nos nós 11, 14 e 21 à 01h, com operação de GDFs e SAEs - Resultado obtido de 78% de restauração



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 21 - Evolução da solução corrente do algoritmo GVNS ao longo das iterações, falta simultânea nos nós 11, 14 e 21 à 01h, com operação de GDFs e SAEs - Resultado obtido de 74% de restauração



Fonte: Produção do próprio autor.

Diferentemente do comportamento apresentado pela BT, o GVNS exibe uma dinâmica de exploração caracterizada por oscilações mais bruscas e patamares de estabilização, refletindo a alternância entre a fase de diversificação, mudança nos critérios de vizinhança e a busca local exaustiva.

Os saltos bruscos positivos observados na curva indicam momentos em que a fase de diversificação foi bem-sucedida ao posicionar o algoritmo em uma estrutura de vizinhança promissora. A partir desse ponto, a busca local utiliza suas vizinhanças para explorar o espaço de busca de forma eficiente, aumentando rapidamente o nível de restauração. Essas variações demonstram a capacidade do algoritmo em escapar de ótimos locais e explorar novas configurações topológicas no sistema de distribuição.

Os segmentos do gráfico sem alteração sugerem iterações sem melhora na função objetivo. Isso ocorre pois os critérios de vizinhança tentam migrar para um espaço sem possibilidades de transferência de carga ou que não melhoram a função objetivo, levando o algoritmo a testar o próximo critério na estrutura do GVNS na próxima iteração em *loop*.

Embora apresente uma convergência mais lenta que a BT, o GVNS mostrou-se robusto, atingindo patamares de restauração equivalentes e explorando variações de resultados que validam a solidez da metodologia.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresentou-se o desenvolvimento e a análise comparativa de duas metodologias computacionais fundamentadas nas metaheurísticas BT e GVNS, aplicadas para a solução do problema de restauração automática de redes aéreas radiais de distribuição de energia elétrica sob condições de faltas permanentes. O objetivo consiste em reconfigurar de forma otimizada a topologia do sistema por meio de manobras em chaves seccionadoras para restabelecer o suprimento de energia ao maior número possível de consumidores afetados, respeitando-se rigorosamente os limites técnicos e operacionais da rede de distribuição.

Os objetivos gerais e específicos da pesquisa foram integralmente atingidos. A introdução do fator horário permitiu modelar com precisão a dinâmica real do sistema elétrico, representando a intermitência característica da GDF, as variações dos perfis de consumo residencial e comercial, e o balanço energético para a operação estratégica dos SAEs por baterias. Adicionalmente, a lógica de controle desenvolvida para a GS viabilizou a formação de microrredes autônomas destinadas ao atendimento exclusivo de cargas emergenciais prioritárias que não toleram interrupções no fornecimento. Durante todo o processo de otimização executado em ambiente MATLAB, a ferramenta MATPOWER garantiu a confiabilidade na determinação das variáveis de estado através do cálculo de fluxos de potência, assegurando que nenhuma solução violasse os limites regulamentares de magnitude de tensão, correntes nos condutores e capacidade das subestações, ao mesmo tempo em que a codificação nó-profundidade garantiu verificações com relação a manter a radialidade do sistema.

As simulações computacionais efetuadas no sistema de 53 nós e três subestações consolidam resultados práticos expressivos que mostram a robustez e a utilidade prática das abordagens propostas. A transição da rede convencional (caso base) para um cenário inteligente com a integração de REDs elevou consideravelmente os índices de restauração de carga. Na média, para as condições de rede apresentadas no trabalho, observou-se um aumento de aproximadamente 20% comparando topologias base com inserção de GDFs e SAEs, e de 6% de aumento nos índices de restauração comparando topologias com GDFs e SAEs e topologias com os mesmos recursos acrescidos de GS em carga prioritária. A análise comparativa entre as duas metaheurísticas revelou contribuições distintas e complementares para a operação de redes de distribuição: o algoritmo baseado em

BT demonstrou excelente consistência e estabilidade nos resultados devido à sua natureza determinística. O uso coordenado das memórias adaptativas de curto prazo (LT curta) e longo prazo (LT longa) mostrou-se altamente eficaz para guiar o refinamento das soluções em ramificações complexas, evitar a ocorrência de ciclagens e contornar ótimos locais por meio da aceitação estratégica de soluções temporariamente degradadas. A BT consolidou-se como uma ferramenta ágil, apresentando tempos médios de processamento adequados para a resolução desse sistema de pequeno porte em tempo real. O algoritmo baseado em GVNS, por sua vez, apresenta uma capacidade de exploração de espaço de busca ligeiramente superior em cenários de alta complexidade topológica. Impulsionado pelas características estocásticas de sua etapa de diversificação, o algoritmo foi capaz de contornar convergências prematuras e descobrir soluções alternativas e topologias distintas às encontradas pela BT.

Como contribuição principal, neste projeto de pesquisa fornecem-se ao setor elétrico e à engenharia de sistemas de potência metodologias automatizadas sólidas que reduzem o tempo e a frequência de interrupções no fornecimento (melhorando os indicadores regulatórios de continuidade como DEC e FEC) e minimizam penalidades financeiras impostas pelos órgãos reguladores. Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se a integração de redes neurais artificiais baseadas em mecanismos de feedback para a determinação otimizada e dinâmica dos parâmetros operacionais utilizados nos algoritmos de busca, viabilizando o ajuste automático de índices estruturais conforme as variações e características do sistema elétrico sob análise. Adicionalmente, recomenda-se a avaliação detalhada do impacto econômico associado às metodologias propostas, contemplando tanto a quantificação financeira dos montantes poupados por meio das restaurações automatizadas da rede quanto a análise de viabilidade e custos dos investimentos tecnológicos considerados no modelo.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8: [Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica]**. Brasília, DF: ANEEL, [07/12/2021]. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf.

DELBEM, A. C. B.; DE CARVALHO, A.; POLICASTRO, C. A.; PINTO, A. K. O.; HONDA, K.; GARCIA, A. C. **Node-depth encoding for evolutionary algorithms applied to network design**. In: GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION–GECCO, 2004, Seattle. Anais... Berlin: Springer, 2004. p. 678–687.

ELKADEEM, M.; ALAAM, M.; AZMY, A. M. Improving performance of underground mv distribution networks using distribution automation system: a case study. *Ain Shams Engineering Journal*, Cairo, v. 9, n. 4, p. 469–481, 2018.

GLOVER, Fred. **Tabu Search — Fundamentals & Uses**. Boulder, CO: Graduate School of Business, University of Colorado, 1995. Disponível em: <https://leeds-faculty.colorado.edu/glover/TS%20-%20Fundamentals&Uses.pdf>.

HANSEN, P.; MLADENOVIC, N.; PÉREZ, J. A. M. **Variable neighbourhood search: methods and applications**. *Annals of Operations Research*, New York, v. 175, n. 1, p. 367–407, 2010.

HANSEN, P.; MLADENOVIC, N.; TODOSIJEVIĆ, R.; HANAFI, S. **Variable neighborhood search: basics and variants**. *EURO Journal on Computational optimization*, Amsterdam, v. 5, n. 3, p. 423–454, 2017.

LAZARO, Rúben; OLIVEIRA, Marina. *Introdução a Metaheurísticas Aplicadas a Sistemas Elétricos de Potência*. Unesp, 2012.

MONTOYA-BUENO, Sergio; MUNOZ, Jose Ignacio; CONTRERAS, Javier. **A Stochastic Investment Model for Renewable Generation in Distribution Systems**. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, no. 4, Outubro de 2015.

ROMERO, Rúben *et al.* **A New Mathematical Model for the Restoration Problem in Balanced Radial Distribution Systems**. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 31, n. 2, p. 1259-1268, 1 mar. 2016.

SMITH, J.; SUNDERMAN, W.; DUGAN, R.; SEAL, B. **Smart inverter volt/var control functions for high penetration of pv on distribution systems**. In: IEEE/PES POWER SYSTEMS CONFERENCE AND EXPOSITION, 2011, Phoenix. Proceedings... Phoenix: IEEE, 2011. p. 1–6.

SONG, Z.; AREVA T&D CHINA TECHNOL. CENTER, SHANGHAI, CHINA; DEMAREE, K; JING, L. **Restoration of a smart distribution system**. In: POWER SYSTEM TECHNOLOGY (POWERCON), 2010 INTERNATIONAL CONFERENCE ON, p. 1-5, Oct 2010.

TAVARES, João Paulo Marques. **Desenvolvimento de metodologia para restauração de redes de distribuição de energia elétrica sujeitas a condições ambientais adversas**. 2021. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica – Área de Automação) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2021.

YAN, Y.; QIAN, Y.; SHARIF, H.; TIPPER, D. **A survey on smart grid communication infrastructures: Motivations, requirements and challenges**. IEEE Communications Surveys & Tutorials, Piscataway, v. 15, n. 1, p. 5–20, 2013.

ZIMMERMAN, R.; MURILLO-SÁNCHEZ, C. **MATPOWER User's Manual Version 7.1**. Disponível em: <https://www.matpower.org/docs/manual.pdf>.

APÊNDICE A - INFORMAÇÕES SOBRE AS CONEXÕES DO SISTEMA DE 53 NÓS

Tabela 4 - Limites de correntes individuais por ramo

Ramo	Limite de corrente em Ampère [A]	Ramo	Limite de corrente em Ampère [A]
101-1	600	28-6	150
101-3	600	104-30	600
4-3	600	29-30	150
7-4	600	43-30	250
5-4	250	37-43	150
8-7	600	31-37	150
6-5	250	10-31	150
9-1	600	43-13	400
2-1	250	45-12	600
10-9	250	44-45	600
102-14	600	38-44	600
15-14	250	39-38	500
16-15	250	32-39	150
102-11	600	33-39	250
12-11	600	8-33	250
13-12	160	33-34	150
20-19	160	34-35	150
19-18	160	35-36	150
18-17	160	40-41	150
17-9	400	16-40	150
21-18	260	42-41	150
104-21	400	48-42	150
104-22	250	49-48	150
22-9	250	50-49	150
23-22	150	47-42	400
24-23	150	46-47	250
25-24	150	14-46	400
8-25	150	35-40	150
27-8	250	10-38	150
26-27	150	28-50	150
28-27	150		

DADOS CURRICULARES

IDENTIFICAÇÃO	
	GUSTAVO DOS SANTOS BARBOSA 19/12/2002
Nacionalidade	brasileira
Nome em citações bibliográficas:	BARBOSA, Gustavo dos Santos. BARBOSA, G. S.
Currículo Lattes	https://lattes.cnpq.br/4696640830346351
FORMAÇÃO ACADÊMICA	
2021/2026	Engenharia Elétrica (Bacharelado) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS)
PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS	
CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNESP, 37., 2025, (Ilha Solteira). Restauração Automática de Redes de Distribuição de Energia Elétrica com Geradores Fotovoltaicos e Sistemas de Armazenamento de Energia. 2025. (Apresentação de Trabalho). CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNESP, 36., 2024, (Ilha Solteira). Restauração Automática de Redes de Distribuição de Energia Elétrica. 2024. (Apresentação de Trabalho).	