

LLULEISI GRANDEZ FERNANDEZ

**PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA CONSIDERANDO
CONFIABILIDADE**

Ilha Solteira - SP
2024

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LLULEISI GRANDEZ FERNANDEZ

**PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA CONSIDERANDO
CONFIABILIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da UNESP, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestra em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Automação.

Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro
Orientador

Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo
Possagnolo
Coorientador

Ilha Solteira - SP

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

G752p Grández Fernández, Lluleisi.
Planejamento da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica considerando confiabilidade / Lluleisi Grández Fernández. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
91 f. : il.

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

Orientador: Rubén Augusto Romero Lázaro

Co-orientador: Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo

Inclui bibliografia

1. Expansão de sistemas de distribuição. 2. Otimização. 3. Meta-heurísticas. 4. Meta-heurística VNS. 5. Topologias radiais em um grafo.


Amanda Sertori dos Santos

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

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A eficiência e confiabilidade no fornecimento de energia elétrica são pilares fundamentais para o desenvolvimento adequado de múltiplas atividades que dependem desse recurso essencial. O impacto desse trabalho se manifesta através de uma metodologia que visa aumentar a confiabilidade do sistema por meio da otimização do número de topologias radiais, que permitem a reposição do fornecimento elétrico em caso de falhas. Esse enfoque estratégico não apenas reduz as probabilidades de interrupções na rede, mas também se estabelece como uma valiosa ferramenta para garantir a continuidade da energia elétrica, contribuindo de maneira significativa para o funcionamento eficaz do sistema.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The efficiency and reliability of the electricity supply are fundamental pillars for the proper development of the many activities that depend on this essential resource. The impact of this work is manifested through a methodology that aims to increase system reliability by optimizing the number of radial topologies, which allow the electricity supply to be restored in the event of faults. This strategic approach not only reduces the likelihood of network interruptions, but also establishes itself as a valuable tool for guaranteeing the continuity of electricity, making a significant contribution to the effective operation of the system.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO


TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Planejamento da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica considerando confiabilidade

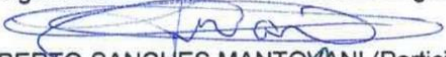
AUTORA: LLULEISI GRANDEZ FERNANDEZ

ORIENTADOR: RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO

COORIENTADOR: LEONARDO HENRIQUE FARIA MACEDO POSSAGNOLO

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


Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


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

Ilha Solteira, 23 de agosto de 2024

AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder vida, saúde, perseverança e por ter me acompanhado ao longo desta jornada.

Minha profunda gratidão aos meus pais, Manuel Asención e María Esperanza pelo amor incondicional e pela incansável dedicação em cada decisão, motivando-me incessantemente a alcançar minhas metas e a nunca desanimar diante das adversidades da vida.

Ao Professor Rubén Augusto Romero Lazaro expesso minha imensa gratidão pela orientação brindada, disponibilidade, apoio incansável, confiança depositada em min e pelos valiosos ensinamentos compartilhados ao longo desta jornada de pesquisa.

Ao professor Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo, meus agradecimentos pela coorientação e apoio na realização deste trabalho de pesquisa. Agradeço a sua disponibilidade em partilhar o seu conhecimento e experiência ao longo deste processo.

Ao Richard, pelas inúmeras ajudas e contribuições, não apenas para o desenvolvimento desta tese, mas também em minha vida. Obrigada pela dedicação, pelo afeto, pelo suporte em cada decisão tomada e por estar ao meu lado durante toda esta jornada.

Aos meus irmãos Leidi, José Deiber e Juan Carlos, pelo apoio incondicional em todos os momentos, sempre me brindando palavras de incentivo e gestos de carinho.

Aos meus colegas do LaPSEE – Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica pela amizade, apoio e convívio.

À comissão examinadora pelos comentários construtivos e valiosas sugestões que contribuíram para a melhoria deste trabalho. A todos os Professores que compartilharam seu conhecimento e aos funcionários da UNESP que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo 2015/21972-6.

*Cada pessoa deve decidir uma vez na vida
se pretende ter sucesso, arriscando tudo, ou
se sentar e observar os vencedores passarem.*

— Thomas Alva Edison

RESUMO

Este trabalho aborda o problema de planejamento da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica (PESD), focando especialmente nos aspectos de confiabilidade. A maioria das propostas de PESD encontra apenas uma topologia ótima que é radial. Entretanto, o sistema de distribuição real tem topologia malhada onde existem ramos que devem estar ativos quando o sistema opera em condição normal e existe um conjunto geralmente reduzido de ramos que devem permanecer desligados na operação normal, mas podem estar ativos quando o sistema opera em condições não normais ou quando se pretende realizar manutenção programada do sistema. Dessa forma, o sistema ligeiramente malhado é mais confiável que um sistema apenas com topologia radial. A proposta desenvolvida neste trabalho envolve a expansão de um sistema de distribuição de 54 barras em duas etapas. Assim, inicialmente se encontra a topologia radial ótima de operação usando um modelo matemático de programação cônica de segunda ordem binário misto (PCSOBM). Posteriormente, na segunda etapa, a partir dessa topologia radial, são incorporados um número adicional de ramos de forma que o sistema malhado apresenta uma estrutura com o máximo número possível de topologias radiais. Essa segunda etapa é resolvida usando a meta-heurística VNS (do inglês Variable Neighborhood Search) nas versões VND (do inglês Variable Neighborhood Descent) e BVNS (do inglês Basic Variable Neighborhood Search). Os resultados obtidos na primeira etapa incluem um custo total de planejamento de 4.788.328 USD, considerando os custos de construção de subestações, construção e recondução de ramos. Adicionalmente na segunda etapa, foram identificados 6 ramos que geram um máximo de 138.768 topologias radiais com um custo total de construção de 54.300 USD. Esta abordagem evidencia que um sistema com uma topologia ligeiramente malhada pode oferecer maior confiabilidade em comparação com sistemas baseados exclusivamente em topologias radiais, destacando a eficácia da metodologia combinada do sistema de expansão junto com os ramos incorporados.

Palavras-chave: expansão de sistemas de distribuição; otimização; meta-heurísticas; meta-heurística VNS; topologias radiais em um grafo.

ABSTRACT

This work addresses the problem of planning the expansion of electric power distribution systems (PESD), focusing especially on reliability aspects. Most PESD proposals find only one optimal radial topology. However, real distribution systems have a meshed topology where there are branches that must be active when the system operates under normal conditions and there is a generally reduced set of branches that should remain disconnected in normal operation but can be active when the system operates under abnormal conditions or when scheduled maintenance is intended. Therefore, a slightly meshed system is more reliable than a system with only a radial topology. The proposal developed in this work involves expanding a 54-bus distribution system in two stages. Initially, the optimal radial operating topology is found using a second-order mixed binary conic programming model (PCSOBM). Subsequently, in the second stage, from this radial topology, an additional number of branches are incorporated so that the meshed system exhibits a structure with the maximum possible number of radial topologies. This second stage is solved using the metaheuristic VNS (Variable Neighborhood Search) in the VND (Variable Neighborhood Descent) and BVNS (Basic Variable Neighborhood Search) versions. The results obtained in the first stage include a total planning cost of 4,788,328 USD, considering substation construction costs, branch construction, and reconductoring costs. Additionally, in the second stage, 6 branches were identified that generate a maximum of 138,768 radial topologies with a total construction cost of 54,300 USD. This approach highlights that a system with a slightly meshed topology can offer greater reliability compared to systems based solely on radial topologies, emphasizing the effectiveness of the combined expansion system methodology with the incorporated branches.

Keywords: expansion of distribution systems; optimization; metaheuristics; VNS meta-heuristic; radial topologies in a graph.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de 14 barras	44
Figura 2 – Matriz laplaciana.....	44
Figura 3 – Sistema de 14 barras modificado	45
Figura 4 – Matriz laplaciana do sistema modificado.....	46
Figura 5 – Fluxograma do AHC aplicado ao problema de PESD.....	53
Figura 6 – Idealização da forma de uma proposta de solução.....	54
Figura 7 – Fluxograma do algoritmo VNS na versão VND.....	59
Figura 8 – Fluxograma do algoritmo VNS na versão BVNS.....	62
Figura 9 – Sistema de 54 barras – Configuração inicial e rotas factíveis propostas	65
Figura 10 – Sistema de 54 barras – Resultado	70
Figura 11 – Magnitudes de tensão dos subsistemas radiais formados após o planejamento ..	72
Figura 12 – Resultados obtidos da meta-heurística VNS na versão BVNS.....	80
Figura 13 – Sistema final com a adição dos ramos adicionais	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Topologia base.....	66
Tabela 2 – Especificações técnicas dos tipos de condutores	67
Tabela 3 – Custos de construção e recondutoramento de ramos	67
Tabela 4 – Dados de subestações.....	68
Tabela 5 – Topologia radial expandida	69
Tabela 6 – Custo do planejamento	71
Tabela 7 – Potência fornecida das subestações	71
Tabela 8 – Ramos não construídos	73
Tabela 9 – Vetor inicial	74
Tabela 10 – Posição dos ramos candidatos no vetor	74
Tabela 11 – Ramos adicionados AHC.....	75
Tabela 12 – Ordem dos ramos adicionados	75
Tabela 13 – Posição dos ramos adicionados	76
Tabela 14 – Ramos candidatos a serem construídos	76
Tabela 15 – Posição do ramo no vetor solução VND.....	77
Tabela 16 – Posição dos ramos solução VND.....	77
Tabela 17 – Ramos adicionados solução VND	78
Tabela 18 – Posição do ramo no vetor solução BVNS.....	79
Tabela 19 – Tipo e custo de condutor atribuído a cada ramo adicionado	81
Tabela 20 – Resultados obtidos	82
Tabela 21 – Dados do sistema de 54 barras.....	92
Tabela 22 – Dados de ramos do sistema de 54 barras	93

LISTA DE ABREVIATURAS

SDEE	Sistema de distribuição de energia elétrica
PLIM	Programação linear inteira mista
PNLIM	Programação não linear inteira mista
PESD	Planejamento da expansão em sistemas de distribuição
SE	Subestação
AMPL	<i>A mathematical programming language</i>
PCSOBM	Programação cônica de segunda ordem binário mista
PCSOIM	Programação cônica de segunda ordem inteira mista
CHA	<i>Constructive Heuristic Algorithm</i>
AHC	Algoritmo heurístico construtivo
VNS	<i>Variable neighborhood search</i>
SDH	<i>Steepest descent heuristic</i>
VND	<i>Variable neighborhood descent</i>
MT	Média tensão
BT	Baixa tensão

LISTA DE SÍMBOLOS

Conjuntos:

Ω_b	Conjunto de barras do sistema.
Ω_c	Conjunto de ramos do sistema.
Ω_a	Conjunto de tipos de condutor.
Ω_U	Conjunto que representa $ij \in \Omega_c$ união $ji \in \Omega_c$.

Parâmetros:

T_i^b	Tipo de barra (carga ou SE na barra i : carga = 0, SE = 1).
P_i^D	Potência ativa demandada na barra i .
Q_i^D	Potência reativa demandada na barra i .
\bar{S}_i	Capacidade da subestação na barra i .
S_i^{gn}	Reforço de potência aparente da SE.
l_{ij}	Comprimento em km do ramo ij .
t_{ij}	Tipo do ramo ij existente.
$C_{t_{ij},a}^{ra}$	Custo por km do condutor de tipo a .
R_a	Resistência por km do condutor de tipo a .
X_a	Reatância por km do condutor de tipo a .
Z_a	Impedância por km do condutor de tipo a .
\bar{I}_a	Limite máximo da magnitude de corrente do condutor do tipo a .
\bar{V}	Magnitude da tensão máxima permitida em uma barra.
\underline{V}	Magnitude da tensão mínima permitida em uma barra.
C_i^s	Custo fixo da construção ou ampliação de subestações na barra i .
α	Número de barras do sistema.
β	Número total de subestações no SDEE.

Variáveis reais:

V_i^{qdr}	Quadrado da magnitude da tensão na barra i .
-------------	--

b_{ij}	Variável auxiliar usada no cálculo da queda de magnitude de tensão no ramo ij quando não é construído nenhum ramo.
P_i^S	Injeção de potência ativa de uma subestação na barra i .
Q_i^S	Injeção de potência reativa de uma subestação na barra i .
$I_{ij,a}^{qdr}$	Quadrado da magnitude de corrente no ramo ij , no condutor do tipo a .
$P_{ij,a}$	Fluxo de potência ativa no ramo ij , no condutor do tipo a .
$Q_{ij,a}$	Fluxo de potência reativa no ramo ij , no condutor do tipo a .
RP_{ij}^t	Variável auxiliar para o produto de R_a e $P_{ij,a}$.
XQ_{ij}^t	Variável auxiliar para o produto de X_a e $Q_{ij,a}$.
$RI2_{ij}^t$	Variável auxiliar para o produto de R_a e $I_{ij,a}^{qdr}$.
$XI2_{ij}^t$	Variável auxiliar para o produto de X_a e $I_{ij,a}^{qdr}$.
$Z2I2_{ij}^t$	Variável auxiliar para o produto de Z_a^2 e $I_{ij,a}^{qdr}$.
x_{ij}	Variável binária auxiliar que indica que o fluxo no ramo ij , ocorre da barra j para a barra i , sendo a barra j a mais próxima da subestação.

Variáveis discretas:

$y_{ij,a}$	Variável binária de construção de um novo ramo ij do condutor de tipo a .
w_i	Variável binária de construção ou ampliação de uma subestação na barra i .
sw_{ij}	Variável binária auxiliar que indica o estado operacional do ramo ij , onde $sw_{ij} = 1$ se o ramo ij está em operação no sistema e $sw_{ij} = 0$ caso contrário.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
1.1.1	Revisão bibliográfica considerando planejamento tradicional	19
1.1.2	Revisão bibliográfica considerando heurísticas e meta-heurísticas	26
1.1.3	Revisão bibliográfica considerando uma topologia ligeiramente malhada	28
1.2	OBJETIVOS.....	30
1.3	CONTRIBUIÇÕES	31
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	31
2	MODELO MATEMÁTICO PARA O PROBLEMA DE PESD	33
3	MELHORANDO A CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	42
3.1	ESTRATÉGIA PARA ENCONTRAR O NÚMERO DE TOPOLOGIAS RADIAIS DE UM GRAFO CONEXO	43
3.2	A META-HEURÍSTICA DE BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL	47
3.3	ALGORITMO HEURÍSTICO CONSTRUTIVO PARA ENCONTRAR UMA TOPOLOGIA LIGERAMENTE MALHADA	50
3.4	IDEALIZAÇÃO DA APLICAÇÃO DA META-HEURÍSTICA DE BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL	54
3.5	APLICAÇÃO DA META-HEURÍSTICA DE BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL NA VERSÃO VND	56
3.6	APLICAÇÃO DA META-HEURÍSTICA DE BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL NA VERSÃO BVNS	60
4	TESTES E RESULTADOS	64
4.1	PRIMEIRA FASE: APLICANDO O PLANEJAMENTO TRADICIONAL	64
4.1.1	Sistema de distribuição de 54 barras	64
4.1.2	Topologia base	67
4.1.3	Resultados do planejamento da expansão em sistemas de distribuição	68
4.2	SEGUNDA FASE: APLICANDO O AHC E VNS	72

4.2.1	Resultados do algoritmo heurístico construtivo	73
4.2.2	Resultados da meta-heurística VNS na versão VND	76
4.2.3	Resultados da meta-heurística VNS na versão BVNS	78
4.2.4	Tipo de condutor utilizado em ramos adicionais.....	81
5	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	85
	REFERÊNCIAS	87
	APÊNDICE A – DADOS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO TESTADO	92

1 INTRODUÇÃO

Hoje em dia a eletricidade se tornou uma parte essencial da sociedade. O investimento contínuo em pesquisa e desenvolvimento no setor elétrico é fundamental para enfrentar os desafios atuais e futuros relacionados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. O PESD é um aspecto crítico a ser abordado, pois afeta diretamente a capacidade de atender à demanda crescente por energia de forma eficiente e confiável (Mendoza, 2010). Ao investir em pesquisas relacionadas ao PESD, podem ser desenvolvidas soluções inovadoras para otimizar a expansão das redes de distribuição, considerando aspectos como custo, qualidade do serviço e resiliência do sistema. Além disso, ao melhorar a qualidade e a confiabilidade dos serviços de energia elétrica, pode ser aumentada a eficiência energética, reduzir os custos operacionais e promover o desenvolvimento sustentável.

Os sistemas de distribuição de energia desempenham um papel importante na garantia de um fornecimento confiável de eletricidade para os consumidores finais, pois são responsáveis por levar a energia elétrica das subestações de transmissão até os consumidores finais, sejam residenciais, comerciais ou industriais. Com o aumento da demanda por energia elétrica devido ao crescimento populacional e ao desenvolvimento industrial e tecnológico, é essencial que as empresas de distribuição planejem cuidadosamente a expansão e modernização de seus sistemas. Isso envolve investir em tecnologias inteligentes de gerenciamento de rede, como medidores inteligentes, sistemas de automação de distribuição e armazenamento de energia. Essas tecnologias não só ajudam a otimizar a operação dos sistemas de distribuição, mas também permitem uma resposta mais rápida à falhas e interrupções, garantindo assim um fornecimento mais confiável de energia para os consumidores.

O processo de expansão dos sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE) envolve uma série de considerações financeiras e técnicas. Os custos associados à expansão podem ser significativos, incluindo investimentos em infraestrutura, construção de novas subestações, aumento da capacidade das subestações existentes e até mesmo a necessidade de recondução de ramos já existentes (Gönen; Ramirez-Rosado, 1986). As empresas do setor elétrico precisam planejar cuidadosamente essas expansões, considerando não apenas os custos operacionais e de investimento, mas também a melhoria da confiabilidade e qualidade do fornecimento. Além disso, o aumento da demanda de energia por parte dos consumidores também impulsiona a necessidade de expansão da rede de distribuição.

O planejamento do SDEE envolve análises técnicas e econômicas para garantir que o fornecimento de energia seja confiável e de alta qualidade, enquanto os custos sejam mantidos menores possível. Ao considerar os altos custos de investimento em novos equipamentos, custos de perda de energia e outros fatores, a distribuidora precisa decidir quando e como expandir ou reforçar o seu sistema. O objetivo final é melhorar a confiabilidade e a qualidade da energia fornecida aos consumidores, analisando restrições técnicas, limites de capacidade nas subestações, as quedas máximas de tensão permitidas nos ramos da rede elétrica e a radialidade do sistema (Ramírez-Rosado; Domínguez-Navarro, 2006). O PESD considera diversas funções objetivo em sua abordagem, incluindo custos de investimento envolvidos na aquisição e instalação de novos equipamentos, como transformadores, cabos, e outros componentes do sistema; custos operacionais dos ramos e subestações, incluindo manutenção e reparos; confiabilidade do sistema o que permite que o sistema de distribuição seja capaz de fornecer energia de forma consistente e sem interrupções indesejadas; e a minimização das perdas de energia no sistema de distribuição, que podem ocorrer devido a diversos fatores, como a resistência dos cabos e dos transformadores (Ganguly; Sahoo; Das, 2013).

Os índices de confiabilidade constituem parte importante do PESD, pois fornecem métricas importantes para avaliar a qualidade do serviço prestado aos usuários. Esses índices, geralmente, consideram a quantidade de vezes que ocorrem interrupções no fornecimento de energia durante um período de tempo específico, o qual é uma medida importante para avaliar a continuidade do fornecimento de energia em uma determinada área; a duração das interrupções de energia, o que fornece diagnóstico sobre a gravidade das interrupções e seu impacto na vida cotidiana dos usuários; e a qualidade da energia fornecida, que inclui aspectos como a tensão estável, a ausência de flutuações de tensão, a presença de harmônicos e outros parâmetros que afetam diretamente a capacidade dos equipamentos e dispositivos elétricos de operarem de maneira eficiente e segura (Gomez Ramirez, 2016). Ao analisar esses índices, as empresas de energia e os órgãos reguladores podem identificar áreas que precisam de melhoria na infraestrutura elétrica, implementar estratégias eficazes de expansão e modernização, e garantir que os padrões de qualidade do serviço elétrico sejam atendidos ou superados.

Finalmente, o planejamento da expansão dos SDEE desempenha um papel importante das empresas distribuidoras, na garantia de um fornecimento confiável e eficiente de energia na sociedade moderna. O PESD é uma ferramenta essencial nesse contexto, pois não só proporciona o projeto de redes com redução de perdas técnicas durante o transporte de energia, mas também permite identificar áreas onde quedas de tensão são mais frequentes, visando melhorar

a qualidade do fornecimento de energia aos consumidores. Além disso, contribui significativamente para a redução de custos operacionais associados ao processo de expansão da rede (Ramírez-Rosado; Domínguez-Navarro, 2006). Ao otimizar o planejamento e a gestão dos recursos, as empresas de energia podem economizar recursos financeiros e materiais, melhorando assim a eficiência global do sistema. Portanto, investir no desenvolvimento e implementação de estratégias de PESD é fundamental para projetar e construir um sistema de distribuição de energia mais confiável, eficiente e economicamente viável.

1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão de literatura neste trabalho é focada em problemas relacionados ao PESD. A primeira parte da revisão apresenta-se as publicações que discutem diversas estratégias de resolução de problemas utilizando métodos tradicionais e considerando a confiabilidade do sistema. Na segunda parte, são apresentados trabalhos que desenvolveram diferentes métodos de planejamento baseados em heurísticas e meta-heurísticas, o que facilita a abordagem de problemas complexos que podem ser difíceis de resolver através de métodos tradicionais. Na terceira e última parte da revisão, trata-se de trabalhos que propõem resolver problemas considerando uma estrutura ligeiramente malhada.

Todas essas investigações visam reduzir custos de operação e investimento, com o objetivo de melhorar o desempenho do sistema de distribuição de energia elétrica e elevar o índice de confiabilidade do sistema.

1.1.1 Revisão bibliográfica considerando planejamento tradicional

O PESD começou a ser estudado há muitos anos. Os primeiros trabalhos foram publicados na década de 1970. Ramirez-Rosado e Bernal-Agustin (1998) apresentam revisões bibliográficas detalhadas dos trabalhos realizados sobre o tema.

Existe uma série de abordagens interessantes para formular e resolver o problema de PESD. Os trabalhos citados em Ponnavaikko, Rao e Venkata (1987) e Gomez *et al.* (2004) abordam diferentes aspectos, desde a minimização de perdas de potência e custos de construção de ramos e subestações. Ramirez-Rosado e Bernal-Agustin (1998) adotaram uma abordagem de modelagem do PESD como um problema de programação não linear inteira mista (PNLIM), visando reduzir custos operacionais e de investimento, enquanto atendem a várias restrições técnicas, como quedas de tensão e limites de fluxo permitidos nos ramos, bem como os limites de potência das subestações e as duas leis de Kirchhoff. Por outro lado, Nara *et al.* (1992) e

Goswami (1997), focam na localização e capacidade ótimas dos ramos de distribuição, levando em consideração a demanda das barras e subestações em diferentes períodos de planejamento, o que é crucial para uma expansão eficiente e sustentável do sistema.

Em Agustín (1998) e Cossi *et al.* (2012) resolve-se o problema de PESD considerando no planejamento a construção e ampliação de subestações, construção e recondutoramento de ramos, além da alocação de chaves seccionadoras. Na função objetivo consideram os custos de instalação e operação, os custos associados à confiabilidade do sistema através da energia não fornecida. Por outro lado, em Gomez *et al.* (2004) o problema de PESD é modelado como um problema de PNLIM. No modelo considera-se a construção de ramos e subestações e a função objetivo está sujeita a custos operacionais e restrições técnicas. Ambas as abordagens visam otimizar o planejamento do SDEE, considerando diferentes fatores. A escolha entre os métodos pode depender das especificidades do problema em questão e das prioridades em termos de custo, confiabilidade e eficiência operacional do sistema elétrico.

O PESD é uma análise importante no setor de energia elétrica, pois garante que a rede de distribuição possa responder eficaz e economicamente às exigências futuras. O planejamento implica a elaboração de um plano de expansão otimizado para diferentes períodos, considerando os investimentos iniciais e os custos operacionais futuros. Além disso, requer uma análise detalhada dos dados do sistema e das projeções de demanda, para determinar o momento e a forma mais adequados para expandir a infraestrutura da rede. Assim, tendo em conta as previsões existentes, é viável identificar onde deverão ser construídas as subestações e ramos, a quantidade que as subestações podem ser reforçadas, bem como as possibilidades de alteração das fontes de abastecimento existentes, e a alocação de reguladores de tensão. Deste modo, garante-se que o sistema proporcione um desempenho ótimo e confiável, capaz de satisfazer o crescimento previsto da demanda, ao mesmo tempo que se minimizam os custos associados à expansão e operação da rede elétrica ao longo do período de planejamento (Ault; Foote; McDonald, 2002) e (Willis, 2004).

O modelo de programação linear inteira mista (PLIM) proposto em Hincapié, Granada e Gallego (2005), tem como objetivo principal otimizar o problema de planejamento, resolvendo o modelo proposto de redes de distribuição elétrica. Neste modelo analisa-se a localização e o dimensionamento das novas subestações, a possibilidade de alteração ou expansão das subestações existentes, a escolha dos condutores para novos ramos, recondutoramento dos ramos atuais, as capacidades máximas das subestações, as restrições de radialidade do sistema, as quedas de tensão aceitáveis nos pontos de conexão, e equilíbrio nodal da rede. Ao integrar

todas essas ações de planejamento e restrições no modelo, procura-se identificar soluções que potencializem o desempenho da rede dentro dos parâmetros e condições estabelecidos.

No artigo, Lotero e Contreras (2011), propõem uma abordagem para enfrentar o desafio do planejamento em vários horizontes de planejamento de uma rede de distribuição elétrica, utilizando um modelo de PLIM. O principal objetivo desta abordagem é minimizar os custos associados à construção ou reforço de subestações, bem como a manutenção e operação geral da rede elétrica. Em cada barra, o modelo leva em consideração três níveis de carga e duas alternativas de investimento para cada recurso adicionado, reforçado ou substituído. Consideram também restrições técnicas, como queda de tensão e necessidade de manutenção da radialidade da rede, garantindo que as soluções propostas sejam tecnicamente viáveis. Índices de confiabilidade e custos associados são calculados para cada solução. Os resultados obtidos permitem encontrar uma variedade de soluções ótimas que consideram aspectos tanto técnicos como econômicos, permitindo ao planejador do sistema analisar e escolher uma das soluções que melhor se adapte às necessidades específicas do sistema em questão, particularmente a confiabilidade.

Em Lavorato *et al.* (2012), apresenta-se um modelo matemático de PNLIM, desenvolvido para resolver de forma eficiente problemas de planejamento em redes de distribuição, lidando com as complexidades associadas a problemas de expansão em sistemas radiais, incorporando restrições de radialidade na estrutura de otimização. Tais restrições melhoram a otimização do sistema de distribuição, assegurando que as soluções estejam alinhadas com a topologia radial. Esta abordagem não só simplifica o processo de resolução de problemas, mas também garante que as soluções sejam práticas, eficientes e alinhadas com as realidades operacionais dos sistemas de distribuição. Os resultados são obtidos através de um algoritmo não linear de ramificação e delimitação.

Em Sahoo, Ganguly e Das (2012), apresenta-se uma abordagem de planejamento multiobjetivo destinada a solucionar problemas em SDEE. Essa abordagem foi projetada para minimizar os custos totais de instalação e operação e, ao mesmo tempo, maximizar a confiabilidade da rede. A otimização é realizada em duas etapas: a primeira etapa concentra-se na otimização da estrutura da rede e no estado das chaves de manobras. Isto envolve identificar a configuração ideal da rede, abrangendo o posicionamento e o número de alimentadores e chaves de seccionamento, com o objetivo de encontrar um equilíbrio entre custo e confiabilidade do sistema. Durante a segunda fase, o foco muda para a otimização dos ramos de interconexão para melhorar ainda mais o desempenho da rede. Os ramos de interligação desempenham um papel crítico na melhoria da confiabilidade do sistema, fornecendo rotas alternativas para o

fluxo de eletricidade, particularmente benéficas em situações de falha do sistema. O algoritmo proposto é testado em diferentes sistemas de distribuição e depois comparado com diferentes topologias de vizinhança para avaliar sua eficácia. Os resultados ilustram que a abordagem proposta é eficaz para o planejamento do sistema de distribuição, alcançando um equilíbrio entre custos e confiabilidade da rede.

Para resolver o problema de seleção da bitola do condutor e recondutoramento ótimo em sistemas de distribuição radial, Franco *et al.* (2013) propõem um modelo PLIM, desenvolvido de forma eficiente para minimizar perdas de energia e custos de investimento, e para avaliar a operação em estado estacionário do sistema utilizam expressões lineares. Para comparar o ponto de operação em regime permanente com o obtido pelo modelo proposto, utilizaram o método de varredura de fluxo de carga, que permite analisar o fluxo de energia em sistemas de distribuição elétrica. Os resultados mostram que o modelo proposto oferece vantagens em relação a outros existentes na literatura, em termos de precisão e capacidade de representar a carga de forma mais realista. Além disso, permite atender a demanda de energia projetada e com o menor custo possível, atendendo às capacidades de condução de corrente e regulação de tensão.

Em Jabr (2013), o problema PESD foi formulado utilizando programação quadrática inteira mista. Neste trabalho visa-se reduzir os custos operacionais e de capital associados à expansão da rede, além de melhorar a qualidade do serviço de energia. A solução foi obtida utilizando *solvers* para problemas de PLIM. No planejamento considera a seleção dos condutores e as rotas de construção dos ramos, bem como a construção e reforço de subestações que atendam à demanda e ao mesmo tempo atendam às limitações técnicas e físicas da rede recentemente ampliada. Além disso, incorporam restrições para evitar a geração de laços na rede de distribuição, garantindo assim uma topologia de rede radial. A aplicabilidade e eficácia do modelo é validada através da sua aplicação em sistemas de teste de várias dimensões, demonstrando sua capacidade de fornecer soluções ótimas de forma eficaz.

Na análise realizada em Franco, Rider e Romero (2014), utilizam uma abordagem baseada em um modelo de programação que combina restrições quadráticas inteiras mistas, tendo como principal ênfase resolver problemas estáticos. Por outro lado, em Pozos *et al.* (2014) propõem um modelo de programação linear binária mista. Em ambos os artigos visa-se resolver o problema do PESD através da construção e reforço de subestações, a capacidade e localização das novas subestações, a construção e recondutoramento de ramos, bem como da possível modificação da topologia radial do sistema. O principal objetivo é reduzir custos de investimento e operação, levando em consideração as restrições operacionais, os limites de magnitude de corrente nos ramos, a potência aparente nas subestações e a configuração radial do sistema. Os

resultados obtidos nos experimentos com os sistemas 23 e 54 apoiam a eficácia dos modelos propostos.

Em Tabares Pozos (2015) é proposta uma abordagem dinâmica para resolver o problema de expansão SDEE, utilizando modelos de programação cônica de segundo ordem inteira mista (PCSOIM) e PLIM. No planejamento consideram-se a construção e reforço de subestações existentes, bem como a construção e recondutoramento de ramos. Da mesma forma, em Tabares *et al.* (2016) propõe-se um modelo para redução de custos na expansão do SDEE com planejamento de longo prazo do PLIM. Este modelo utiliza linearização e aborda a construção de subestações, aumento de capacidade das subestações existentes, alocação de reguladores de tensão, construção de ramos e o recondutoramento de ramos existentes no sistema inicial, bem como as possíveis alterações na topologia do sistema. Por outro lado, um modelo de PNLIM é considerado em Macedo e Romero (2016) para resolver o problema de PESD. O objetivo foi determinar o melhor plano dentro da estrutura de planejamento do sistema elétrico e a técnica proposta foi aplicada a um sistema de 54 barras, alcançando uma solução viável para o problema. Os artigos citados acima propõem métodos para melhorar a expansão do SDEE, com o objetivo de otimizar custos e melhorar a eficiência do sistema.

Para calcular os índices de confiabilidade de redes em modelos de distribuição com restrições de confiabilidade, Muñoz-Delgado, Contreras e Arroyo (2018) apresentam uma nova perspectiva baseada em técnicas de otimização. Em vez de utilizar a simulação tradicional, na programação linear considera-se as topologias da rede como variáveis de decisão em um processo de otimização, permitindo encontrar índices equivalentes. A contribuição mais significativa envolve o desenvolvimento de um método de programação linear para avaliar a confiabilidade de um sistema de distribuição. Ao descrever a topologia da rede por meio da otimização, esse método garante precisão matemática, propriedades de convergência comprovadas e qualidade da solução, permitindo que abordagens não heurísticas incorporem a avaliação de confiabilidade no planejamento do sistema de distribuição e nos modelos operacionais.

Em Muñoz-Delgado, Contreras e Arroyo (2018), apresenta-se um modelo PLIM que integra confiabilidade ao problema de PESD multiestágio. Esta abordagem utiliza variáveis de decisão para descrever a estrutura da rede e determinar a melhor alternativa, localização e tempo de instalação dos ativos propostos, considerando critérios econômicos e de confiabilidade. A avaliação da confiabilidade centra-se na estimativa da energia esperada não fornecida, incluindo a análise do possível impacto de falhas e interrupções na rede elétrica. Esta medição é essencial para avaliar o desempenho do sistema sob diversas condições operacionais e cenários de falha. Os resultados obtidos na simulação demonstram a eficácia da abordagem proposta. A

integração da confiabilidade como critério explícito no planejamento da expansão permite não só otimizar o investimento em infraestruturas elétricas, mas também reforçar a capacidade do sistema em manter a continuidade do serviço de fornecimento elétrico em caso de imprevistos.

Com o objetivo de maximizar a utilidade e satisfazer a demanda prevista do sistema, Kaewmamuang *et al.* (2019) propõem uma metodologia para otimizar a expansão de subestações de distribuição em várias fases. A abordagem proposta determina a localização, capacidade e cronograma de construção ideais vinculados às subestações. A metodologia leva em consideração uma série de fatores técnicos e operacionais, como a queda de tensão, a estrutura radial da rede e a capacidade de expansão e operação, que garantem uma rede robusta e eficiente. O método proposto usa variáveis binárias para estabelecer a conexão entre pontos de recarga e subestações, e variáveis inteiras para estabelecer a capacidade de expansão das subestações, encontrando assim soluções dentro das limitações e restrições estabelecidas.

No artigo Bosisio *et al.* (2021), apresenta-se uma metodologia para enfrentar os desafios associados ao PESD utilizando uma abordagem baseada no modelo PLIM. O objetivo é projetar uma rede que otimize a eficiência econômica quanto à confiabilidade do sistema sob diversas condições operacionais. A estratégia incorpora limitações tanto na topologia quanto na parte elétrica, juntamente com um índice de risco que tem como principal objetivo maximizar a confiabilidade do sistema elétrico. A formulação matemática inclui restrições relacionadas a ramos e subestações. Estas restrições são essenciais para garantir que a rede projetada seja capaz de atender aos requisitos de carga esperados e aos padrões de segurança operacional, minimizando ao mesmo tempo os custos associados à expansão e manutenção do sistema.

A ideia de abordar em conjunto a rede de média tensão (MT) e baixa tensão (BT) com o propósito de reduzir custos e investimentos é extremamente relevante, dado que ambas as redes estão interligadas e as suas eficiências são interdependentes. Em Rupolo *et al.* (2021), propõem um método para abordar o planejamento de redes de distribuição elétrica de grande escala, abrangendo redes de MT e BT através do uso de técnicas computacionais. A formulação matemática centra-se na alocação estratégica de subestações e ramos de MT e BT. Da mesma forma, no planejamento considera-se as perdas de energia nos cabos e subestações de distribuição, bem como a confiabilidade do sistema. Os resultados numéricos mostram que a metodologia proposta é capaz de encontrar soluções eficazes que garantam a redução dos custos associados ao planejamento.

No artigo Jooshaki *et al.* (2022), propõe-se um modelo PLIM para integrar explicitamente a avaliação de confiabilidade no planejamento de expansão em vários estágios de redes

de distribuição. A metodologia oferece uma formulação que incorpora a avaliação da confiabilidade, abordando os impactos das interrupções de manobras, da operação radial e dos esquemas de incentivo à confiabilidade, integrando-os diretamente nas variáveis de otimização. Esta abordagem PLIM é formulada com um conjunto reduzido de variáveis e restrições, garantindo desempenho eficiente dos algoritmos e reduzindo custos computacionais significativos sem comprometer a precisão da solução. Os custos associados à confiabilidade são considerados com base em esquemas de incentivos e perdas causadas por falta de fornecimento de energia durante cortes de energia aos clientes. Como parte do estudo, os testes foram aplicados em redes de diferentes dimensões.

Em Rastgou e Hosseini-Hemati (2022) propõe-se uma abordagem de otimização em dois níveis para o planejamento integrado de redes de distribuição de MT e BT, considerando variações na demanda. No modelo de dois níveis proposto, na fase superior busca-se minimizar o investimento e o custo operacional da rede de MT, o que envolve a tomada de decisões estratégicas sobre a localização e capacidade das subestações de distribuição e alimentadores de MT para satisfazer a demanda de forma eficiente. Por outro lado, no nível inferior procura-se reduzir os custos de investimento e de funcionamento da rede BT tendo em conta as perdas de potência. A solução para o problema foi encontrada através de um algoritmo genético de alta qualidade, cujos resultados demonstram a eficácia do modelo proposto, que leva a melhorias na eficiência e rentabilidade das redes de distribuição elétrica.

No artigo, Tabares *et al.* (2022), apresenta-se um modelo matemático para resolver o problema de PESD multiestágio, onde a confiabilidade e a radialidade da rede são explicitamente consideradas. Neste modelo visa-se minimizar o custo total de expansão da subestação, que inclui tanto os custos de investimento como os custos de operação, considerando o impacto da confiabilidade nesses custos. Uma das principais contribuições reside na inclusão explícita de uma métrica de confiabilidade, denominada energia não fornecida esperada, através do desenvolvimento de expressões matemáticas na formulação do problema de planejamento. Além disso, na abordagem proposta leva-se em conta, com precisão, as potências ativa e reativa, utilizando uma aproximação linear por partes. O problema de otimização resultante foi formulado como um problema PLIM, que permite encontrar soluções ótimas. Os resultados mostram a eficácia da metodologia proposta, oferecendo soluções de alta qualidade com um esforço computacional razoável, o que gera planos de expansão mais econômicos que, ao mesmo tempo, melhoram a confiabilidade do sistema.

1.1.2 Revisão bibliográfica considerando heurísticas e meta-heurísticas

A exploração de abordagens alternativas surge como resposta a dilemas altamente complicados que desafiam a abordagem convencional, sendo computacionalmente demorados ou mesmo inatingível encontrar uma solução ótima em um tempo razoável. Nesta revisão, são analisadas pesquisas que detalham e contrastam diferentes estratégias heurísticas e meta-heurísticas, avaliando sua eficácia em diversas aplicações. São abordadas conceitos-chaves, como navegação no espaço de busca e exploração de soluções.

Para encontrar a solução para o problema de planejamento de redes de distribuição, que é definido como um problema de programação não linear binário misto altamente complexo, Lavorato *et al.* (2009) apresentam uma técnica de otimização apresentada como um algoritmo heurístico construtivo (AHC). O algoritmo busca encontrar progressivamente uma solução de alta qualidade adicionando gradualmente ramos ou subestações à rede, usando um índice de sensibilidade. O índice de sensibilidade é calculado relaxando as variáveis de decisão binárias, tratando-as posteriormente como variáveis contínuas. O principal objetivo é reduzir os custos totais, que incluem tanto os custos de construção e operação de ramos e subestações como os custos associados à perda de potência ativa nos ramos. A abordagem proposta abrange uma estratégia de ramificação destinada a prevenir situações em que as operações não sejam viáveis, bem como uma estratégia de melhoria local. Os resultados do estudo indicam a capacidade do método em identificar um plano de expansão ideal para redes de distribuição que resulte em custos totais mais baixos em comparação com outras abordagens.

O problema PESD apresentado em Souza (2011) aborda a construção e recondução de ramos, construção e reforço de subestações elétricas, considerando os custos de construção e operação ao longo de um horizonte de planejamento. A abordagem utilizada para enfrentar este desafio envolve a implementação de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável (VNS), na sua versão VND (*variable neighborhood descent*). Esta técnica proporciona a capacidade de avaliar diversas configurações em diferentes estruturas vizinhas, permitindo uma análise detalhada de custo-benefício no sistema. Além disso, para fornecer um ponto de partida de qualidade para o VNS empregaram um AHC. Este AHC demonstra capacidade de identificar soluções viáveis de alta qualidade, melhorando assim o desempenho geral da meta-heurística. Os resultados obtidos através desta metodologia revelam topologias radiais, sendo que cada topologia radial está ligada a uma subestação.

No trabalho de Pereira Junior *et al.* (2014) propõe-se um algoritmo de busca tabu multiobjetivo para resolver o problema de planejamento, em várias fases, de um sistema de distribuição, formulado como um problema de PNLIM multiobjetivo. A função objetivo é composta pelos custos de investimento, de operação e pela confiabilidade considerando as restrições físicas e técnicas. Esta formulação considera a construção de novas subestações, o aumento da capacidade das subestações existentes, a construção e recondutoramento de ramos, a alocação de seccionadores, e a construção de ramos de ligação. A confiabilidade do sistema é avaliada pela energia não fornecida em situação de contingência, utilizando o critério $n - 1$. Durante o processo de restabelecimento das cargas afetadas na rede de distribuição devido a fchas ou manutenção do sistema, é possível avaliar a energia não fornecida através da rede. Para o restabelecimento, considera-se a reconfiguração de ramos e a utilização de ramos de ligação à rede. Apresentara-se os resultados obtidos para o problema na simulação de um sistema de 54 barras.

Na literatura, o foco principal do planejamento da expansão dos sistemas de distribuição está nos sistemas de MT. Existe pouca pesquisa sobre planejamento de sistemas de BT e sistemas integrados de MT/BT. Rupolo *et al.* (2017) apresentam uma abordagem matemática abrangente para o planejamento de redes de distribuição considerando os sistemas de MT e BT. O modelo é formulado como um problema de PNLIM que procura reduzir os custos de investimento relacionados com a construção de novos ramos de BT, bem como a substituição de ramos e a construção e o aumento de capacidade de subestações existentes. Os custos de operação e manutenção são representados pelas perdas causadas nos ramos BT e subestação, e pela confiabilidade do sistema refletida no custo de energia não distribuída. Quanto à codificação topológica do problema, baseia-se na teoria de grafos conhecida na literatura como codificação de profundidade de barra. O modelo matemático é resolvido pelo método meta-heurístico GVNS (*general variable neighborhood search*), que possibilita explorar o espaço de busca utilizando critérios de intensificação e diversificação. A solução encontrada permite determinar a capacidade das subestações, a localização apropriada para construir novos ramos de BT com seus respectivos tipos de condutores, a substituição de ramos de BT e MT com os tipos de condutores correspondentes e a topologia radial do sistema de MT e BT.

Em Possagnolo (2019) é proposto um modelo PCSOIM para resolver o problema PESD, abordando aspectos econômicos e de confiabilidade, além de incorporar a restauração do fornecimento após uma falha ou manutenção do sistema. Para resolver o problema, propõem-se duas abordagens alternativas: uma baseada em uma abordagem matemática tradicional a ser resolvida usando métodos exatos, e outra a meta-heurística VNS, utilizando uma técnica de

busca de vizinhança para encontrar uma solução aproximada sem garantia de ser ótima, mas com considerável eficiência em termos de tempo computacional. A formulação contempla a instalação de subestações, a melhoria das subestações existentes, a construção de ramos e o recondutoramento de ramos existentes, bem como a melhoria contínua do fornecimento elétrico para aumentar a confiabilidade. Os resultados mostram que a inclusão da restauração no planejamento leva a soluções com maiores custos operacionais e de investimento, porém, com índice de confiabilidade de rede superior às soluções disponíveis na literatura.

De Almeida, Da Rocha e De Freitas (2021) apresentam uma metodologia para o PESD de média tensão através da aplicação de um AHC. Este algoritmo é implementado em um sistema com múltiplas partidas com o objetivo principal de fornecer energia aos consumidores atuais e futuros. Vários fatores, como minimização de custos de construção, redução de perdas de energia e otimização de perfis de tensão, são considerados na geração de um conjunto de topologias radiais viáveis. Além disso, para resolver este problema, empregam um modelo matemático não linear, e a solução é obtida gradual e progressivamente através de um processo iterativo. Em cada ciclo de iteração, utilizam um indicador de sensibilidade para determinar qual ramo construir, seguido da realização de testes computacionais para analisar e medir a eficácia e desempenho do algoritmo. Os resultados da simulação apresentam soluções viáveis e de alta qualidade, indicando que a abordagem proposta é eficaz para facilitar o planejamento de expansão de sistemas de distribuição de média tensão.

1.1.3 Revisão bibliográfica considerando uma topologia ligeiramente malhada

A maioria dos sistemas de distribuição de energia elétrica são inicialmente projetados com topologia radial devido à sua simplicidade e menor custo de infraestrutura e, geralmente, são expandidos considerando apenas uma topologia radial. No entanto, esta metodologia apresenta limitações em termos de confiabilidade e capacidade de restauração rápida em caso de falhas. Isto implica que cada carga é alimentada a partir de uma única subestação através de um único caminho. Porém, as redes de distribuição possuem uma estrutura em malha, de modo que existem múltiplas rotas para alimentar cada carga. Isto significa que se uma linha ou subestação falhar, a energia pode ser redirecionada através de outras rotas para manter o fornecimento aos consumidores afetados.

Em Camargo, Lavorato e Romero (2013) apresentam uma abordagem inovadora para calcular o fluxo de potência em redes de energia que não estão completamente interligadas, particularmente aquelas com uma estrutura de malha fraca. Além disso, propõem um algoritmo

específico para resolver o problema PESD que é formulado como um problema de PNLIM. Para o planejamento são considerados múltiplas variáveis e restrições complexas, tais como a construção e recondutoramento de ramos para diferentes tipos de condutores, e a construção e reforço de subestações. A função objetivo tem como foco a minimização dos custos totais, incluindo os custos de construção e operação durante um horizonte de tempo específico. Além disso, introduzem estratégias para aumentar a diversidade e melhorar a qualidade das soluções obtidas, adaptando assim o algoritmo para resolver problemas de inviabilidade durante a busca, garantindo que a grande maioria das soluções geradas sejam viáveis e aplicáveis dentro da estrutura do sistema de energia.

A maioria dos estudos que se concentram em abordar o desafio de restaurar o fornecimento de energia nos sistemas de distribuição utilizam uma abordagem baseada num modelo de corrente contínua. O objetivo deste modelo é identificar uma topologia radial que possa operar com segurança, mínimos custos de investimento e operação. Porém, Macedo, Ortega-Vazquez e Romero (2018) propõem um modelo de otimização PCSOIM para o PESD, em vez de usar um modelo de corrente contínua. O principal objetivo desta proposta é encontrar uma topologia malhada que possibilite restaurar a carga em caso de falhas ou manutenções, ao mesmo tempo que reduza os custos de expansão. Procura também identificar topologias radiais para o funcionamento do sistema que permitam reduzir a quantidade de energia não fornecida. Na análise foram consideradas ampliações de subestações, reforço das existentes e ampliação e recondutoramento de ramos. Para testar a eficácia deste modelo, foi aplicado a um sistema de 24 barras. Os resultados obtidos mostraram que, embora os custos tenham aumentado 28,82% em relação ao método tradicional, as cargas conseguiram ser restabelecidas. Em uma rede malhada, alguns ramos operam como uma rede radial e outras permanecem desconectadas. Porém, em caso de falha ou manutenção, esses ramos podem ser conectados, para permitir que a subestação alimente a carga.

Para abordar o problema de PESD, Lin, Hu e Song (2019) apresentam uma abordagem de programação matemática que adere ao critério $N - 1$. Este critério sugere estratégias de investimento ideais para configurações de ramo fechado e ramo aberto. Ao utilizar este método é possível obter soluções ótimas globais de PESD sem comprometer sua escalabilidade. Para reduzir a complexidade do modelo, primeiro relaxam-se as restrições do critério $N - 1$ e, em seguida, o problema é resolvido incorporando gradualmente restrições de contingência vinculante, que são identificadas usando o método matemático de PLIM. Embora o PESD tenha sido amplamente explorado nos últimos anos, a maioria dos estudos centrou-se exclusivamente em

soluções de planejamento radial, que normalmente não são aplicáveis aos sistemas de distribuição reais. Para melhorar a continuidade do fornecimento de energia, é essencial que o sistema de distribuição de energia real seja projetado basicamente como um ramo fechado baseado no critério $N - 1$, permitindo a transferência de carga através da reconstrução da rede.

Em Jooshaki *et al.* (2021), os autores apresentam formulações lineares destinadas a avaliar a confiabilidade de sistemas de distribuição elétrica através do uso de variáveis topológicas, considerando interrupções de chaveamento. Os dois modelos matemáticos propostos estão sujeitos às restrições de confiabilidade, uma para redes radiais e outra para redes malhadas que são operadas radialmente. Estas formulações se destacam por fornecer melhor qualidade de solução, maior eficiência computacional e melhor escalabilidade em comparação aos algoritmos de otimização heurística existentes. Além disso, podem ser facilmente integrados em vários estudos de planejamento e operação de sistemas de distribuição, fornecendo métricas de confiabilidade mais precisas. Os resultados obtidos em vários estudos de casos confirmam a precisão e escalabilidade da metodologia, apoiando a sua aplicabilidade e eficácia na melhoria do planejamento e operação de redes de distribuição elétrica.

As redes de distribuição urbana são projetadas para serem altamente confiáveis, sendo construídas em malha e operando como um sistema radial, permitindo a restauração do fornecimento de eletricidade nas áreas afetadas através de ramos de conexão, alternativas aplicadas após uma falha do sistema. Para encontrar uma solução mais adequada ao projetar estas redes de distribuição, costumam-se utilizar métodos heurísticos e de simulação, embora nem sempre assegurem uma otimização global. Nesse sentido, Li *et al.* (2021) apresentam um novo modelo de planejamento de expansão em várias etapas para redes de distribuição em malha, que incorpora a avaliação de confiabilidade como restrições explícitas, o que influencia diretamente as decisões de investimento e confiabilidade. A restauração da carga após a falha entre alimentadores, considerando os requisitos de confiabilidade tanto para redes construídas em malha quanto para redes radialmente construídas, pode levar a uma redução no custo de investimento.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta dissertação é analisar e propor uma forma diferente de expandir um sistema de distribuição de energia elétrica, considerando uma nova estratégia para aumentar a confiabilidade do sistema, maximizando o número de topologias radiais em uma rede ligeiramente malhada, viabilizando a reposição eficiente do fornecimento de energia em situações de falhas e/ou manutenção.

Entre os objetivos secundários estão os seguintes:

1. Implementar e analisar um modelo de programação cônica de segundo ordem binário misto (PCSOBM) para abordar o PESD, contemplando a construção e o reforço de subestações, a construção de novos ramos e o recondutoramento dos ramos existentes;
2. Desenvolver um AHC para a obtenção de uma solução inicial de boa qualidade, a partir dos resultados obtidos com o modelo matemático PCSOBM, visando melhorar a confiabilidade do sistema, através da inclusão estratégica de certos ramos, de modo que o PESD levemente malhado forme um grafo contendo o maior número possível de topologias radiais;
3. Desenvolver uma meta-heurística VNS nas suas versões VND e BVNS, com o intuito primordial de aprimorar os resultados alcançados pelo AHC.

1.3 CONTRIBUIÇÕES

Esta dissertação apresenta as seguintes contribuições:

1. Propor uma nova abordagem para aumentar a confiabilidade em um sistema de distribuição, dividindo a estratégia de otimização em duas etapas (etapa determinística e etapa meta-heurística).
2. Possibilidade de incorporar um certo número ramos adicionais no sistema expandido com o intuito de melhorar a confiabilidade e manter o sistema em funcionamento em situações de falhas ou manutenções.
3. Desenvolvimento de uma topologia ligeiramente malhada do sistema para proporcionar maior flexibilidade e capacidade de enfrentar cenários de contingências, promovendo, assim, a resiliência do sistema elétrico.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado da forma mostrada a seguir:

Capítulo 1: Foi feita uma contextualização e revisão bibliográfica do problema PESD.

Capítulo 2: Apresenta-se a formulação matemática de um modelo PCSOBM para o PESD, considerando a expansão e construção de subestações, assim como a construção e recondutoramento de ramos cada um com seu respectivo tipo de condutor. No modelo considera-se apenas um horizonte de expansão e encontra a topologia radial ótima do sistema expandido.

Capítulo 3: Apresenta-se uma estratégia para adicionar ramos extras ao sistema radial expandido encontrado a partir da formulação matemática, de forma a encontrar uma topologia ligeiramente malhada com o maior número de topologias radiais existentes no sistema expandido e, portanto, melhorando a confiabilidade do sistema de distribuição expandido.

Capítulo 4: São apresentados e analisados os resultados obtidos pelo modelo matemático apresentado na primeira fase, e os resultados obtidos na segunda fase resultantes da aplicação dos ramos adicionais ao sistema expandido.

Capítulo 5: Neste capítulo apresentam-se as conclusões e desenvolvimentos futuros.

No Apêndice A, apresentam-se dados do sistema utilizado no teste realizado neste trabalho.

2 MODELO MATEMÁTICO PARA O PROBLEMA DE PESD

O problema de PESD apresentado neste trabalho é formulado como um modelo PCSOBM, no qual o modelo determina a melhor topologia radial para o funcionamento de um SDEE que foi expandido para atender às necessidades futuras em um horizonte de planejamento específico.

A função objetivo do modelo, mostrada em (1), representa os custos de investimento e operação. O primeiro termo representa o custo das SE (custos de investimento), e o segundo termo corresponde ao custo associado aos ramos (custos de construção/recondutoramento que dependem do tipo de ramo e do tipo de condutor). A Variável w_i é uma variável binária que assume o valor de $w_i = 1$ quando a subestação na barra i é construída ou reforçada, e, $w_i = 0$, caso contrário; $y_{ij,a}$ é uma variável binária que assume o valor de $y_{ij,a} = 1$ se um condutor do tipo a for instalado no ramo ij e $y_{ij,a} = 0$, caso contrário; e por último o parâmetro l_{ij} representa o comprimento do ramo ij em km (Lavorato, 2010) e (Lavorato; Rider *et al.*, 2010).

$$\text{minimizar } \sum_{i \in \Omega_b | T_i^b = 1} C_i^s w_i + \sum_{ij \in \Omega_c} \sum_{a \in \Omega_a} C_{t_{ij,a}}^{ra} l_{ij} y_{ij,a} \quad (1)$$

As restrições que representam a operação em estado estacionário de um sistema de distribuição radial são apresentadas de (2) a (15). Observa-se que as restrições (2)–(13), com exceção da com exceção da (10) são representações lineares; por outro lado, as expressões (10) e (15), embora descrevam o mesmo, apresentam-se de maneira não linear devido à presença de termos quadráticos e produtos de duas variáveis. A restrição (2) e (6) representa o balanço de potência ativa e, (3) e (8) o balanço de potência reativa do sistema na barra i . As restrições (9) e (13), e (10) e (15) correspondem a restrições resultantes da aplicação da Lei das Tensões de Kirchhoff no sistema elétrico. A restrições (9) e (13) são usadas para calcular a queda de tensão no ramo ij . As restrições (10) e (15) são restrições cônicas de segunda ordem que estabelecem a relação entre o fluxo de potência atual e reativa, o quadrado da magnitude da tensão (no final do ramo) e o quadrado da magnitude do fluxo de corrente no ramo ij (Franco; Rider; Romero, 2014).

Entendendo que as expressões (2) e (3) simbolizam, cada uma, o equilíbrio entre as potências ativa e reativa nas barras, respectivamente.

$$\sum_{ji \in \Omega_c} \sum_{a \in \Omega_a} P_{ji,a} - \sum_{ij \in \Omega_c} \sum_{a \in \Omega_a} (P_{ij,a} + R_a l_{ij} I_{ij,a}^{qdr}) + P_i^s = P_i^D, \quad \forall i \in \Omega_b \quad (2)$$

$$\sum_{ji \in \Omega_c} \sum_{a \in \Omega_a} Q_{ji,a} - \sum_{ij \in \Omega_c} \sum_{a \in \Omega_a} (Q_{ij,a} + X_a l_{ij} I_{ij,a}^{qdr}) + Q_i^s = Q_i^D, \quad \forall i \in \Omega_b \quad (3)$$

Reformulando convenientemente a restrição (2), obtém-se a restrição (4):

$$\sum_{ji \in \Omega_c} \sum_{a \in \Omega_a} P_{ji,a} - \sum_{ij \in \Omega_c} \left(\sum_{a \in \Omega_a} P_{ij,a} + l_{ij} \sum_{a \in \Omega_a} R_a I_{ij,a}^{qdr} \right) + P_i^s = P_i^D, \quad \forall i \in \Omega_b \quad (4)$$

Onde:

$$\sum_{a \in \Omega_a} P_{ij,a} = P_{ij}^t \quad ; \quad l_{ij} \sum_{a \in \Omega_a} R_a I_{ij,a}^{qdr} = RI2_{ij}^t, \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (5)$$

Ao substituir as restrições de (5) em (4), obtém-se a expressão (6):

$$\sum_{ji \in \Omega_c} P_{ji}^t - \sum_{ij \in \Omega_c} (P_{ij}^t + RI2_{ij}^t) + P_i^s = P_i^D, \quad \forall i \in \Omega_b \quad (6)$$

De forma análoga à expressão (6), decorrem da formulação (3) as expressões matemáticas (7) e (8).

$$\sum_{a \in \Omega_a} Q_{ij,a} = Q_{ij}^t \quad ; \quad l_{ij} \sum_{a \in \Omega_a} X_a I_{ij,a}^{qdr} = XI2_{ij}^t, \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (7)$$

$$\sum_{ji \in \Omega_c} Q_{ji}^t - \sum_{ij \in \Omega_c} (Q_{ij}^t + XI2_{ij}^t) + Q_i^s = Q_i^D, \quad \forall i \in \Omega_b \quad (8)$$

As restrições (9) e (10) correspondem às restrições resultantes da aplicação da Lei das Tensões de Kirchhoff no sistema elétrico. A restrição (9) é usada para calcular a queda de tensão no ramo ij . A restrição (10) é uma restrição cônica de segunda ordem que estabelece a relação entre o fluxo de potência atual e reativa, o quadrado da magnitude da tensão (no final do ramo) e o quadrado da magnitude do fluxo de corrente no ramo ij .

$$V_i^{qdr} - V_j^{qdr} = \sum_{a \in \Omega_a} [2(R_a P_{ij,a} + X_a Q_{ij,a}) l_{ij} + Z_a^2 l_{ij}^2 I_{ij,a}^{qdr}] + b_{ij}, \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (9)$$

$$V_j^{qdr} \sum_{a \in \Omega_a} I_{ij,a}^{qdr} \geq \left(\sum_{a \in \Omega_a} P_{ij,a} \right)^2 + \left(\sum_{a \in \Omega_a} Q_{ij,a} \right)^2, \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (10)$$

Reescrevendo convenientemente a restrição (9), obtém-se surge a expressão (12):

$$V_i^{qdr} - V_j^{qdr} = 2 \left(l_{ij} \sum_{a \in \Omega_a} R_a P_{ij,a} + l_{ij} \sum_{a \in \Omega_a} X_a Q_{ij,a} \right) + l_{ij}^2 \sum_{a \in \Omega_a} Z_a^2 I_{ij,a}^{qdr} + b_{ij}, \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (11)$$

Onde:

$$l_{ij} \sum_{a \in \Omega_a} R_a P_{ij,a} = R P_{ij}^t; \quad l_{ij} \sum_{a \in \Omega_a} X_a Q_{ij,a} = X Q_{ij}^t; \quad l_{ij}^2 \sum_{a \in \Omega_a} Z_a^2 I_{ij,a}^{qdr} = Z Z I_{ij}^t, \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (12)$$

Substituindo a restrição (12) na restrição (11), obtém-se a formulação (13):

$$V_i^{qdr} - V_j^{qdr} = 2(R P_{ij}^t + X Q_{ij}^t) + Z Z I_{ij}^t + b_{ij}, \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (13)$$

A partir da restrição (10), obtém-se as expressões em (14):

$$I_{ij}^{qdr,t} = \sum_{a \in \Omega_a} I_{ij,a}^{qdr}; \quad P_{ij}^t = \sum_{a \in \Omega_a} P_{ij,a}; \quad Q_{ij}^t = \sum_{a \in \Omega_a} Q_{ij,a}, \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (14)$$

Substituindo (14) em (10):

$$V_j^{qdr} I_{ij}^{qdr,t} \geq P_{ij}^{t,2} + Q_{ij}^{t,2}, \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (15)$$

As formulações cônicas, apresentadas nas restrições (10) e (15), mostram o mesmo conceito, porém expresso de maneira distinta. Essas restrições, originalmente de igualdade, são transformadas em restrições cônicas ao serem convertidas em desigualdades com a finalidade de facilitar ao solver em encontrar a solução em menor tempo. A inclusão de (10) e (15) nos

modelos resultam em uma formulação mais manejável, em vez de lidar diretamente com o problema sob a forma de restrições de igualdade, o que é mais difícil de resolver (Franco; Rider; Romero, 2014).

As restrições (16) e (17) limitam a variável auxiliar b_{ij} em termos do estado operacional do ramo ij . Ou seja, se o ramo estiver conectado, então $b_{ij} = 0$; caso contrário, b_{ij} é limitado por, $\bar{V}^2 - \underline{V}^2$, que representa a queda de tensão no ramo.

$$b_{ij} \leq (\bar{V}^2 - \underline{V}^2) \left(1 - \sum_{a \in \Omega_a} y_{ij,a} \right), \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (16)$$

$$b_{ij} \geq -(\bar{V}^2 - \underline{V}^2) \left(1 - \sum_{a \in \Omega_a} y_{ij,a} \right), \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (17)$$

Onde:

$$sw_{ij} = \sum_{a \in \Omega_a} y_{ij,a}, \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (18)$$

A restrição (18) determina que se $sw_{ij} = 1$, um condutor de tipo a será instalado nesse ramo ij ; entretanto, caso $sw_{ij} = 0$, nenhum tipo de condutor será instalado nesse ramo ij .

Substituindo a restrição (18) em (16) e (17), obtém-se a restrição (19):

$$|b_{ij}| \leq (\bar{V}^2 - \underline{V}^2) (1 - sw_{ij}), \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (19)$$

Os limites para a magnitude da tensão são definidos por (20). A restrição (21) estabelece os limites para a magnitude da corrente do ramo ij , relacionados a cada tipo de condutor e seu estado operacional (conectado ou desconectado).

$$\underline{V}^2 \leq V_i^{qdr} \leq \bar{V}^2, \quad \forall i \in \Omega_b \quad (20)$$

$$I_{ij,a}^{qdr} \leq \bar{I}_a y_{ij,a}, \quad \forall ij \in \Omega_c, a \in \Omega_a \quad (21)$$

As restrições (22) e (23) mostram que os valores máximos ($\bar{V} \bar{I}_a$) e o estado operacional de cada ramo impõem restrições aos módulos do fluxo de potência ativa e reativa. Adicionalmente, essas restrições aprimoram a eficiência computacional e a qualidade das soluções alcançadas.

$$|P_{ij,a}| \leq \bar{V} \bar{I}_a y_{ij,a}, \quad \forall ij \in \Omega_c, a \in \Omega_a \quad (22)$$

$$|Q_{ij,a}| \leq \bar{V} \bar{I}_a y_{ij,a}, \quad \forall ij \in \Omega_c, a \in \Omega_a \quad (23)$$

A restrição (24) representa a condição de que pelo menos um novo ramo deve ser construído e formado por pelo menos uma barra de carregamento. Esta restrição não é necessária para definir o conjunto de soluções viáveis, mas é incluída no modelo para reduzir o esforço computacional necessário para sua solução.

$$\sum_{ij \in \Omega_c | (i=k || j=k)} \sum_{a \in \Omega_a} y_{ij,a} \geq 1, \quad \forall k \in \Omega_b | T_k^b = 0 \quad (24)$$

Ao substituir a restrição (18) na restrição (24), chegamos à expressão (25).

$$\sum_{ij \in \Omega_c | (i=k || j=k)} sw_{ij} \geq 1, \quad \forall k \in \Omega_b | T_k^b = 0 \quad (25)$$

Como o quadrado da potência aparente é igual à soma do quadrado da potência real e da potência reativa fornecida pela subestação, tem-se que o quadrado da potência aparente fornecida pela subestação é limitado por (26). O lado direito da expressão (26) representa a capacidade máxima inicial mais a capacidade máxima adicional proporcionada pela construção e/ou ampliação da subestação.

$$(P_i^S)^2 + (Q_i^S)^2 \leq \bar{S}_i^2 + (\bar{S}_i S_i^{gn} + S_i^{gn2}) w_i, \quad \forall i \in \Omega_b | T_i^b = 1 \quad (26)$$

A restrição de radialidade apresentada em (27), junto com as restrições de balanço de potência (2) e (3), garantem que, ao final do processo iterativo, não haja interconexão entre duas ou mais subestações. A restrição (27) estabelece que o número $\alpha - \beta$ de ramos existentes e em

construção deve ser igual ao número de $\alpha - \beta$ barras no sistema menos o número de subestações, formando uma rede radial para cada subestação construída. Onde α representa o número de barras no SDEE e $\beta = \sum_{i \in \Omega_b} T_i^b$ o número total de subestações no SDEE.

$$\sum_{ij \in \Omega_c} \sum_{a \in \Omega_a} y_{ij,a} = \alpha - \beta, \quad (27)$$

Substituindo a restrição (18) na restrição (27) obtém-se (28).

$$\sum_{ij \in \Omega_c} sw_{ij} = \alpha - \beta, \quad (28)$$

Uma abordagem alternativa para garantir a radialidade na execução de sistemas de distribuição é descrita pelas restrições (29), (30) e (31) (Jabr; Singh; Pal, 2012). Variáveis binárias auxiliares, x_{ij} e x_{ji} , são atribuídas a cada ramo ij , indicando a direção do fluxo no ramo. O estado operacional no ramo ij é representado por sw_{ij} , de modo que se $sw_{ij} = 1$, então o ramo ij está ligado ao sistema, e desconectado em caso contrário.

$$x_{ij} + x_{ji} = sw_{ij}, \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (29)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_U} x_{ij} \leq 1, \quad \forall i \in \Omega_b | T_i^b = 1 \quad (30)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_U} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in \Omega_b | T_j^b = 0 \quad (31)$$

A restrição (29) estabelece que somente uma direção é viável para o fluxo no ramo ij se $sw_{ij} = 1$, e se $sw_{ij} = 0$, então ambas variáveis binárias auxiliares são iguais a zero para o ramo ij . Se o fluxo é da barra j para a barra i (sendo a barra j mais próxima da subestação), então $x_{ji} = 1$ se o fluxo é de i para j (com a barra i mais próxima da subestação). A restrição (30) determina que as barras de passagem podem ou não ser conectadas à rede, enquanto a restrição (31) assegura que para cada barra de carga i existe apenas um fluxo de entrada, sendo que todos os demais devem deixar essa barra.

O modelo PCSOBM para o PESD apresentado em (1) - (31) é resumido e apresentado nas expressões (32) - (56):

$$\text{minimizar } \sum_{i \in \Omega_b | T_i^b = 1} C_i^s w_i + \sum_{ij \in \Omega_c} \sum_{a \in \Omega_a} C_{tij,a}^{ra} l_{ij} y_{ij,a} \quad (32)$$

Sujeito a:

$$\sum_{ji \in \Omega_c} P_{ji}^t - \sum_{ij \in \Omega_c} (P_{ij}^t + RI2_{ij}^t) + P_i^s = P_i^D, \quad \forall i \in \Omega_b \quad (33)$$

$$\sum_{ji \in \Omega_c} Q_{ji}^t - \sum_{ij \in \Omega_c} (Q_{ij}^t + XI2_{ij}^t) + Q_i^s = Q_i^D, \quad \forall i \in \Omega_b \quad (34)$$

$$V_i^{qdr} - V_j^{qdr} = 2(RP_{ij}^t + XQ_{ij}^t) + Z2I2_{ij}^t + b_{ij}, \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (35)$$

$$\sum_{a \in \Omega_a} P_{ij,a} = P_{ij}^t ; \quad l_{ij} \sum_{a \in \Omega_a} R_a I_{ij,a}^{qdr} = RI2_{ij}^t, \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (36)$$

$$\sum_{a \in \Omega_a} Q_{ij,a} = Q_{ij}^t ; \quad l_{ij} \sum_{a \in \Omega_a} X_a I_{ij,a}^{qdr} = XI2_{ij}^t, \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (37)$$

$$l_{ij} \sum_{a \in \Omega_a} R_a P_{ij,a} = RP_{ij}^t ; \quad l_{ij} \sum_{a \in \Omega_a} X_a Q_{ij,a} = XQ_{ij}^t ; \quad l_{ij}^2 \sum_{a \in \Omega_a} Z_a^2 I_{ij,a}^{qdr} = Z2I2_{ij}^t, \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (38)$$

$$V_j^{qdr} I_{qdr_{ij}}^t \geq P_{ij}^t{}^2 + Q_{ij}^t{}^2, \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (39)$$

$$I_{qdr_{ij}}^t = \sum_{a \in \Omega_a} I_{ij,a}^{qdr} ; \quad P_{ij}^t = \sum_{a \in \Omega_a} P_{ij,a} ; \quad Q_{ij}^t = \sum_{a \in \Omega_a} Q_{ij,a}, \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (40)$$

$$|b_{ij}| \leq (\bar{V}^2 - \underline{V}^2)(1 - sw_{ij}), \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (41)$$

$$sw_{ij} = \sum_{a \in \Omega_a} y_{ij,a}, \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (42)$$

$$\underline{V}^2 \leq V_i^{qdr} \leq \bar{V}^2, \quad \forall i \in \Omega_b \quad (43)$$

$$I_{ij,a}^{qdr} \leq \bar{I}_a^2 y_{ij,a}, \quad \forall ij \in \Omega_c, a \in \Omega_a \quad (44)$$

$$|P_{ij,a}| \leq \bar{V} \bar{I}_a y_{ij,a}, \quad \forall ij \in \Omega_c, a \in \Omega_a \quad (45)$$

$$|Q_{ij,a}| \leq \bar{V} \bar{I}_a y_{ij,a}, \quad \forall ij \in \Omega_c, a \in \Omega_a \quad (46)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_c | (i=k || j=k)} sw_{ij} \geq 1, \quad \forall k \in \Omega_b | T_k^b = 0 \quad (47)$$

$$(P_i^S)^2 + (Q_i^S)^2 \leq \bar{S}_i^2 + (\bar{S}_i S_i^{gn} + S_i^{gn2}) w_i, \quad \forall i \in \Omega_b | T_i^b = 1 \quad (48)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_c} sw_{ij} = \alpha - \beta, \quad (49)$$

$$x_{ij} + x_{ji} = sw_{ij}, \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (50)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_U} x_{ij} \leq 1, \quad \forall i \in \Omega_b | T_i^b = 1 \quad (51)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_U} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in \Omega_b | T_j^b = 0 \quad (52)$$

$$w_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (53)$$

$$y_{ij,a} \in \{0,1\} \quad \forall ij \in \Omega_c, a \in \Omega_a \quad (54)$$

$$sw_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (55)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall ij \in \Omega_U \qquad (56)$$

O modelo de PCSOBM não é uma versão aproximada do modelo PNLIM, mas é equivalente. Isto ocorre porque a ativação da restrição de desigualdade cônica (39) leva a uma solução equivalente quando se considera a restrição não linear. Em termos mais simples, a transição de uma restrição não linear para uma restrição cônica é uma forma de relaxar o problema, pois em vez de resolver diretamente uma formulação com uma restrição mais complexa relacionada à igualdade, ela é substituída por uma formulação mais convexa que utiliza uma restrição de desigualdade, que ajuda a resolver o problema.

3 MELHORANDO A CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

A maioria das propostas de otimização da expansão do sistema de distribuição de energia elétrica encontra uma topologia radial que otimiza os custos de operação e de expansão do sistema de distribuição para um horizonte de planejamento. Entretanto, os sistemas de distribuição são construídos de forma ligeiramente malhada e, portanto, em operação normal, um conjunto de ramos opera formando uma topologia radial e outro conjunto de ramos, geralmente em número reduzido, devem permanecer desligados. Os ramos desligados permitem aumentar a confiabilidade do sistema de distribuição. Dessa forma, se um ramo ou um conjunto de ramos que se encontra em operação é desligado do sistema elétrico devido a uma falta, então os ramos normalmente desligados podem ser ligados em um processo de restauração. Dessa forma, os ramos construídos, e que normalmente permanecem desligados, podem ser usados em condições especiais de faltas ou de manutenção programada e, portanto, o sistema tem maior confiabilidade.

Existem poucas propostas para expandir o sistema de distribuição de forma ligeiramente malhada e que apresente confiabilidade adequada. Neste trabalho, propõe-se usar um conceito para expandir o sistema de distribuição de energia elétrica para assumir a forma ligeiramente malhada. Dessa forma, a proposta de otimização assume a seguinte estrutura.

1. Inicialmente o sistema é expandido na forma tradicional encontrando a topologia radial ótima de operação como foi apresentado no capítulo anterior.
2. Escolhe-se um número p de ramos adicionais que devem ser construídos e que devem permanecer desligados em operação normal.
3. A hipótese de confiabilidade é de que um sistema de distribuição é mais confiável se um sistema ligeiramente malhado construído com a adição de p ramos adicionais gera um grafo e esse grafo contém o maior número de topologias radiais.

A hipótese de confiabilidade sugerida pode ser melhor explicada usando um exemplo. Por exemplo, supor um sistema de 33 barras onde se pretende construir 37 ramos. Uma certa proposta A de expansão com 32 ramos formando uma topologia radial e $p_A = 5$ ramos desligados pode ter 50.751 topologias radiais possíveis de operação. Outra proposta de expansão B ,

formado por outro conjunto de 32 ramos formando a topologia radial e $pB = 5$ ramos desligados pode ter 74.578 topologias radiais possíveis de operação. Nesse contexto, a proposta B é melhor que a proposta A porque quando acontece uma falta, a proposta B tem maior possibilidade de manter o sistema operando sem corte de carga porque tem um número maior de possibilidades de operação em topologia radial ligando ramos que normalmente se encontram desligados.

Neste trabalho, a partir de uma topologia radial já encontrada usando uma técnica de otimização, pretende-se identificar um conjunto adicional de p ramos que devem ser construídos junto com a topologia radial de forma que o conjunto de ramos construídos forme uma rede ligeiramente malhada. Uma rede ligeiramente malhada pode gerar um conjunto diferente de topologias radiais. Dessa forma, busca-se encontrar o conjunto de ramos que devem ser construídos e permanecer desligados em operação normal de forma que o grafo que representa essa rede tenha o maior número possível de topologias radiais.

Em resumo, dada uma topologia radial e conhecendo um conjunto de ramos R que pode ser construído, pretende-se identificar um subconjunto de ramos de R , chamado de conjunto P de cardinalidade p de forma que o conjunto total de ramos construídos permita gerar o número máximo de topologias radiais. Esse processo de identificação é um problema de otimização que deve ser resolvido usando uma meta-heurística.

3.1 ESTRATÉGIA PARA ENCONTRAR O NÚMERO DE TOPOLOGIAS RADIAIS DE UM GRAFO CONEXO

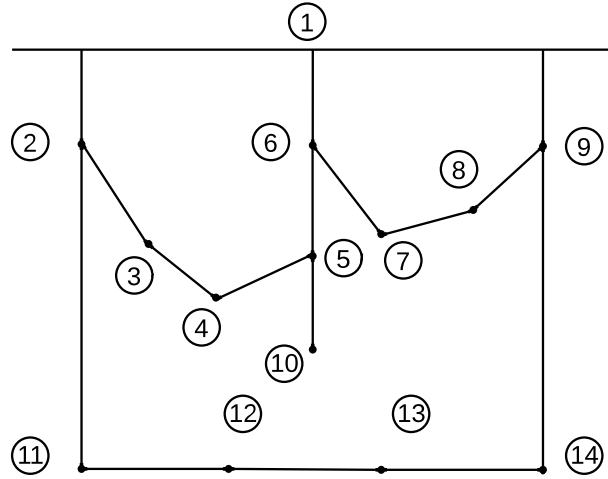
Um sistema de distribuição radial pode ser considerado um grafo conexo. Para um sistema de distribuição de energia elétrica malhado é possível encontrar o número de topologias radiais contidas no grafo desse sistema de distribuição radial. Esse cálculo pode ser realizado usando o teorema da matriz-árvore:

Teorema da Matriz-Árvore:

Seja G um grafo conexo e L a matriz laplaciana desse grafo. Nesse contexto, o número de árvores geradoras (topologias radiais) desse grafo G é igual ao valor de qualquer cofator l_{ij} de L . A prova desse teorema pode ser encontrada em Macedo *et al.* (2018), e Harris, Hirst e Mossinghoff (2008). Esse teorema permite calcular o número exato de topologias radiais que existe em um sistema de distribuição. Pode-se ilustrar a aplicação desse teorema calculando o

número de topologias radiais diferentes que existem no sistema de 14 barras e 16 ramos mostrados na Figura 1.

Figura 1 – Sistema de 14 barras



Fonte: (Civanlar; Grainger *et al.*, 1988)

Cada elemento da matriz L é encontrado usando a seguinte relação:

$$l_{ij} = \begin{cases} grau(i) & \text{Se } i = j \\ -1 & \text{Se } i \text{ é diferente de } j \text{ e existe um ramo entre } i \text{ e } j \\ 0 & \text{em outro caso} \end{cases} \quad (57)$$

onde grau(i) indica o grau da barra i , isto é, o número de ramos conectados à barra i . Para o sistema de 14 barras, mostrado na Figura 1, a matriz L é mostrada na Figura 2.

Figura 2 – Matriz laplaciana

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
1	3	-1				-1			-1						
2	-1	3	-1								-1				
3		-1	2	-1											
4			-1	2	-1										
5				-1	3	-1				-1					
6	-1				-1	3	-1								
7						-1	2	-1							
8							-1	2	-1						
9								-1	3					-1	
10					-1					1					
11		-1									2	-1			
12											-1	2	-1		
13												-1	2	-1	
14									-1				-1	2	

Fonte: (Macedo; Franco *et al.*, 2018)

Figura 4 – Matriz laplaciana do sistema modificado

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
$L =$	3	-1				-1			-1						1
	-1	3	-1								-1				2
		-1	2	-1											3
			-1	2							-1				4
					2	-1					-1				5
	-1				-1	2									6
							2	-1		-1					7
							-1	2	-1						8
	-1							-1	3						9
				-1	-1		-1			3					10
		-1									2	-1			11
											-1	2	-1		12
												-1	2	-1	13
									-1				-1	2	14

Fonte: Elaborada pela autora.

Os exemplos ilustrativos, apresentados anteriormente, mostram que trocando de posição alguns ramos o número de topologias radiais existentes em um grafo conexo pode mudar. Dessa forma, para um grafo que tem o mesmo número de ramos, existe um grafo que apresenta a maior número de topologias radiais e, de acordo com a hipótese aventada, o sistema de distribuição que apresenta essa topologia seria o que apresenta maior confiabilidade perante fenômenos que desligam uma parte do sistema devido a problemas imprevistos ou de manutenção programada. A teoria apresentada para encontrar o número de topologias radiais diferentes existentes em um grafo, deve ser usada para adicionar alguns ramos adicionais na topologia radial encontrada no capítulo anterior de forma que o sistema resultante seja uma topologia malhada com o maior número de topologias radiais que podem ser gerados desse grafo ligeiramente malhado.

Para adicionar esses ramos adicionais, é necessário usar uma técnica de otimização que comece com um AHC para encontrar a solução inicial. Em seguida, as versões VND e BVNS da meta-heurística de busca em vizinhança variável (VNS) são empregadas para refinar a solução gerada pelo AHC. As próximas seções irão detalhar essa meta-heurística e como ela pode ser implementada no contexto do PESD.

3.2 A META-HEURÍSTICA DE BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL

Uma meta-heurística é uma estratégia de busca através do espaço de busca de um problema complexo. A busca é realizada através de transições no espaço de busca a partir de uma proposta de solução inicial ou de um conjunto de propostas de soluções iniciais. Nesse contexto, a diferença principal entre as diferentes meta-heurísticas é a estratégia usada para realizar as transições no espaço de busca. A meta-heurística VNS (*variable neighborhood search*) é apenas uma generalização da heurística SDH (*steepest descent heuristic*) que realiza um processo de busca através do espaço de busca usando um conjunto de estruturas de vizinhança de cardinalidade variável. A cardinalidade de uma vizinhança é o número de vizinhos da proposta de solução corrente que pode ser calculada após a definição ou caracterização de vizinhança. Nesse aspecto fundamental, VNS é significativamente diferente de outras meta-heurísticas.

A maioria das meta-heurísticas aceitam a degradação da proposta de solução corrente (ou do conjunto de soluções correntes) como uma estratégia para sair de uma solução ótima local. O algoritmo VNS não aceita essa possibilidade. O algoritmo VNS muda a vizinhança como uma forma de sair de soluções ótimas locais. Nesse processo, a proposta de solução corrente também é a incumbente o que não acontece com as outras meta-heurísticas. Assim, pode-se afirmar que o algoritmo VNS realiza um conjunto de transições no espaço de busca de um problema e em cada passo a transição é realizada para uma nova solução incumbente. Se no processo de busca encontra-se um ótimo local, então o algoritmo VNS muda de vizinhança para sair desse ótimo local e passar para a nova incumbente. Como uma consequência dessa estratégia, se o algoritmo VNS encontra o ótimo global, então a busca fica estagnada nesse ponto de ótimo global sem possibilidade de sair desse ponto. Esse tipo de comportamento não acontece com as outras meta-heurísticas. Deve-se observar que na heurística SDH também o processo de otimização não acontece uma degradação da função objetivo e, portanto, as transições são realizadas de uma solução incumbente para uma nova solução incumbente.

A estratégia do algoritmo VNS é inspirada na observação de três fatos importantes:

- **Fato 1:** Um mínimo local em relação a uma estrutura de vizinhança não necessariamente é ótimo local em relação a outra estrutura de vizinhança.
- **Fato 2:** O mínimo global é um ótimo local em relação a todas as possíveis estruturas de vizinhança.
- **Fato 3:** Para muitos problemas o mínimo local em relação a uma estrutura de vizinhança tem muita informação comum em relação a outras estruturas de vizinhança.

A última observação é particularmente importante na formulação de um algoritmo VNS. A observação de caráter empírica implica que uma solução ótima local fornece informação importante em relação ao ótimo global, especialmente, se a solução ótima local for de excelente qualidade. Existe também a observação empírica de que as soluções ótimas locais geralmente estão concentradas em regiões específicas do espaço de busca. Se as soluções ótimas locais estivessem uniformemente distribuídas no espaço de busca todas as meta-heurísticas se tornariam ineficientes. Portanto, se for encontrado um ótimo local da região em que se encontra o ótimo global, então uma meta-heurística tipo VNS tem grande chance de encontrar esse ótimo global. Por outro lado, se o ótimo global se encontra em outra região, então a única possibilidade de encontrar o ótimo global é implementar um processo de diversificação. Por esse motivo um equilíbrio entre intensificação e diversificação no processo de busca pode ser importante em uma meta-heurística.

A meta-heurística VNS é apenas uma generalização da heurística SDH. Na heurística SDH, a partir de uma proposta de solução inicial, avaliam-se todas as propostas de solução vizinhas que são ordenadas por qualidade. Se a melhor proposta de solução vizinha é de melhor qualidade, então, deve-se realizar a transição para essa proposta de solução vizinha que se transforma na proposta de solução corrente. Em caso contrário, deve-se terminar o processo de otimização.

A heurística SDH apresenta a seguinte forma:

1. Passo preliminar: Montar os dados do problema. Escolher uma forma de codificação de uma proposta de solução denominada de p . Identificar uma forma de avaliar a qualidade da função objetivo ou equivalente e denominada $f(p)$. Definir a estrutura de vizinhança a ser usada, o que caracteriza o espaço de busca.
2. Encontrar uma solução inicial p_o que se transforma na solução corrente p_c .
3. Identificar e avaliar todas as soluções vizinhas da solução corrente p_c e identificar a melhor solução vizinha p_{best} .
4. Se $f(p_{best}) < f(p)$ então a melhor solução vizinha é melhor que a solução corrente e, portanto, fazer $p_c \leftarrow p_{best}$ e voltar ao passo 3. Em caso contrário, pare o processo e a solução encontrada pela heurística SDH é p_c (geralmente um ótimo local).

Propõe-se mostrar que a versão VND da meta-heurística VNS é apenas uma generalização da heurística SDH. Existem várias formas de implementar o algoritmo VNS e, portanto, podem ser implementados uma família de algoritmos VNS. Nesta dissertação, implementa-se

apenas as versões VND e BVNS. As principais versões da meta-heurística VNS são as seguintes:

- VND (*Variable neighborhood descent*).
- RVNS (*reduced variable neighborhood search*).
- BVNS (*basic variable neighborhood search*).
- GVNS (*general variable neighborhood search*).

Deve-se observar que o VND é essencialmente determinístico, assim como o SDH, o RVNS tem uma componente estocástica e as outras versões representam estratégias mais sofisticadas.

A meta-heurística VND apresenta a seguinte forma:

1. Passo preliminar: Montar os dados do problema. Escolher uma forma de representar uma proposta de solução denominada de p . Identificar uma forma de avaliar a qualidade da função objetivo ou equivalente e denominada $f(p)$. Definir um conjunto de estruturas de vizinhança $N_s, s = 1, \dots, s_{max}$ que devem ser usados no processo iterativo;
2. Encontrar uma solução inicial p_o que se transforma na solução corrente p_c ;
3. Fazer $s \leftarrow 1$;
4. Identificar e avaliar todas as soluções vizinhas da solução corrente p_c para o nível de vizinhança s . Identificar a melhor proposta de solução vizinha p_{best} ;
5. Se $f(p_{best}) < f(p_c)$, então a melhor solução vizinha é melhor que a solução corrente e, portanto, fazer $p_c \leftarrow p_{best}$ e voltar ao passo 3. Em caso contrário, ir ao passo 6;
6. Se $s = s_{max}$ pare o processo e a solução encontrada pelo VND é p_c . Em caso contrário, fazer $s \leftarrow s + 1$ e voltar ao passo 4;

Em relação ao algoritmo VND, deve-se realizar as seguintes observações:

- É apenas uma generalização da heurística SDH. SDH tem apenas uma estrutura de vizinhança. VND tem um conjunto de s_{max} estruturas de vizinhança, sendo cada nova estrutura de vizinhança de cardinalidade maior que a estrutura precedente.
- Cada vez que a análise de uma vizinhança apresenta êxito, isto é, foi encontrada uma proposta de solução vizinha melhor que a proposta de solução corrente, então, deve-se voltar para o nível de vizinhança mais básico N_1 . Em caso contrário, deve-se passar para o seguinte nível de vizinhança.

- SDH e VND realizam transições que geram um processo da solução incumbente corrente para uma nova solução incumbente.
- VND é essencialmente determinístico.

O algoritmo VND representa a forma mais simples de formular um algoritmo VNS. Entretanto, esse tipo de algoritmo básico pode ser integrado em uma estrutura mais complexa de algoritmo VNS. Quando o algoritmo VND for usado de forma independente, deve-se priorizar a busca de soluções de “excelente” qualidade. Por outro lado, se o algoritmo VND é usado em estruturas mais complexas pode ser mais importante encontrar uma boa solução mais rapidamente.

A meta-heurística BVNS apresenta a seguinte estrutura:

1. Passo preliminar: Selecione o conjunto de estruturas de vizinhança $N_s, s = 1, \dots, s_{max}$, que será utilizado na busca; defina um critério de parada;
2. Encontrar uma solução inicial x_{inc} que se transforma na solução corrente x_i ;
3. Faça $s \leftarrow 1$;
4. Repita os passos a seguir até $s = s_{max}$:
 - a) Gere aleatoriamente uma solução x para o nível de vizinhança s de x_{inc} ($x \in N_s(x_{inc})$);
 - b) Aplique o método de busca local com x como solução inicial; denote por x^b o ótimo local obtido por esta busca;
 - c) Se o ótimo local x^b é melhor que a solução incumbente x_{inc} , faça ($x_{inc} \leftarrow x^b$) e continue a busca em N_1 ($s \leftarrow 1$); caso contrário faça $s \leftarrow s + 1$;

3.3 ALGORITMO HEURÍSTICO CONSTRUTIVO PARA ENCONTRAR UMA TOPOLOGIA LIGERAMENTE MALHADA

Inicialmente, durante a fase de PESD, é possível projetar um ou vários sistemas de distribuição elétrica de forma radial, podendo incluir determinados ramos que foram considerados no plano inicial, mas que acabaram não sendo construídos. Nesse contexto específico, quando se torna necessário encontrar uma estrutura de rede ligeiramente malhada do que a atualmente em uso, que evolui a partir de uma topologia radial com o objetivo de melhorar a confiabilidade do sistema de distribuição expandido, é essencial apresentar uma sugestão de boa qualidade, embora não necessariamente ótima, em relação ao número de diferentes topologias de rede que poderiam ser construídas. Isto permitirá que a energia seja restaurada rapidamente caso surja uma falha ou seja necessária manutenção na infraestrutura do sistema.

A ideia principal é incorporar p ramos adicionais à topologia encontrada anteriormente, com o objetivo de que o sistema ligeiramente malhado tenha um maior número de configurações radiais no grafo da rede de distribuição inicial. As informações de entrada para resolver este problema incluem os diferentes m ramos que compõem a topologia da rede radial que foram encontrados utilizando técnicas clássicas de otimização, além de um grupo potencial de n_s ramos candidatos a serem adicionados.

Este problema pode ser resolvido através da aplicação de técnicas de otimização clássica, heurística ou meta-heurística. Neste trabalho aborda-se esta questão aplicando um AHC e a meta-heurística VNS nas suas versões VND e BVNS.

Num processo de implementação de um algoritmo heurístico construtivo CHA (na forma simplificada do inglês Constructive Heuristic Algorithm), uma das decisões cruciais reside em saber selecionar um indicador de sensibilidade (IS) que seja capaz de identificar o componente que deve ser adicionado à solução em construção. Este índice IS, que está relacionado com o número de topologias radiais, é encontrado calculando o determinante da matriz Laplaciana modificada (LM).

O indicador de sensibilidade utilizado no AHC e na meta-heurística VNS nas suas versões VND e BVNS é representado da seguinte forma:

$$IS_{ij} = ntr_{ij} \quad (59)$$

onde ntr_{ij} é o número de topologias radiais existentes no grafo da topologia corrente simulando a adição do ramo livre ij . Dessa forma, o ramo livre ij com o maior valor de ntr_{ij} deve ser escolhida para ser incorporada na topologia corrente. O valor de ntr_{ij} é calculada encontrando o valor absoluto da determinante da matriz laplaciana modificada, ML .

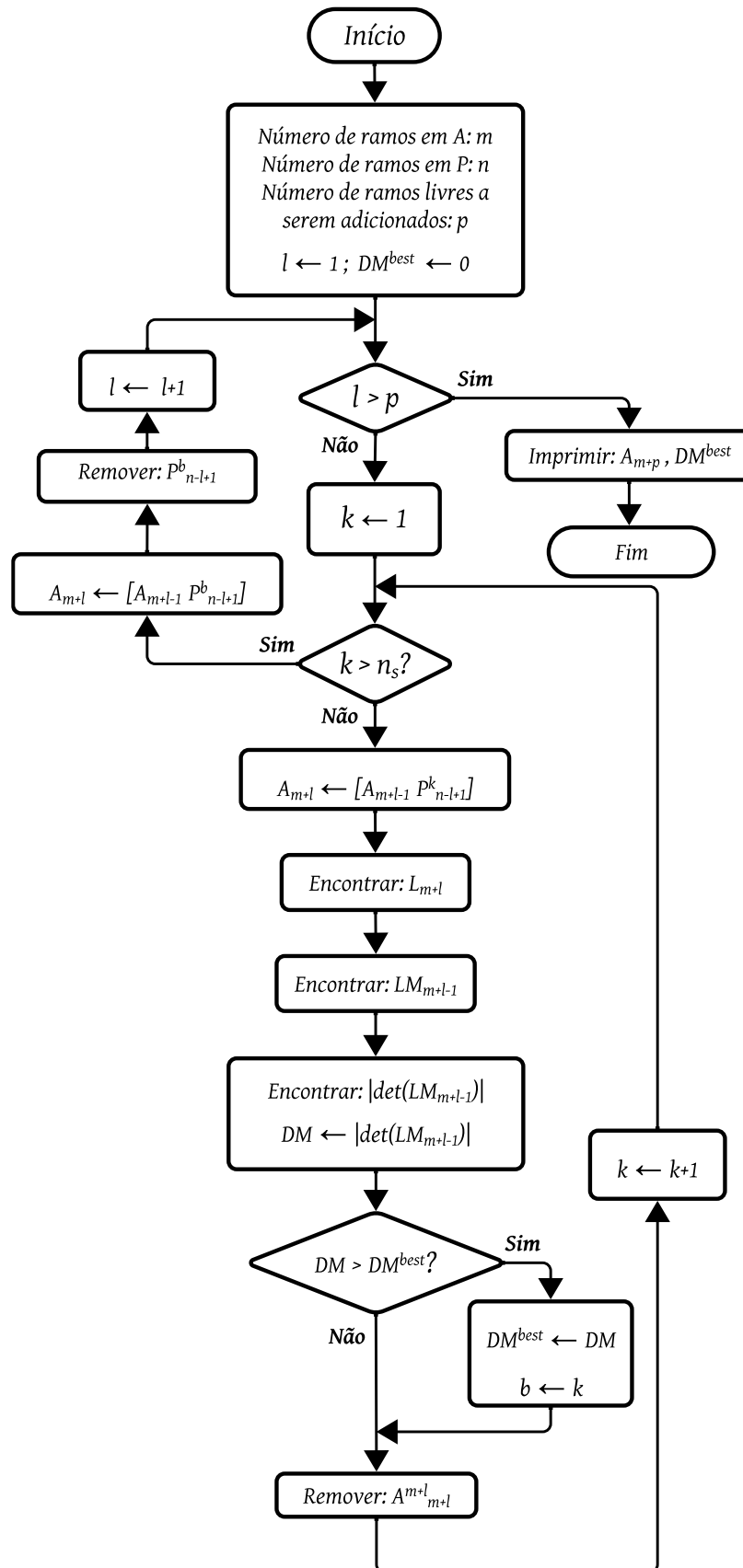
A estrutura lógica do AHC, é detalhada como:

1. Armazene os m ramos da topologia radial encontrada na fase 1 no vetor A (A_m) que se transforma na topologia corrente, armazene os n_s ramos livres candidatos no vetor P (P_n) e armazene também o número de ramos livres (p) do vetor P a serem incorporados.
2. Inicialize um contador l com valor um ($l \leftarrow 1$) e defina o maior valor encontrado para o determinante como zero ($DM^{best} \leftarrow 0$). O valor de l especifica o número de ramos de melhor qualidade que inicialmente faziam parte de P e que foram sendo adicionados gradualmente ao sistema até atingir os ramos $m + p$.

3. Adicione, um por um, o ramo localizado na k – ésima posição de P (P^k_{n-l+1}), aos ramos que fazem parte do sistema em A (A_{m+j-1}), para formar um novo sistema composto por $m + l$ ramos (A_{m+l}).
4. Construa a matriz laplaciana L_{m+l} a partir dos dados do vector A_{m+l} . Em seguida, prosiga para encontrar a matriz Laplaciana modificada LM (LM_{m+l-1}) removendo uma linha e uma coluna de L_{m+l} . Isso permite encontrar o valor absoluto do determinante da matriz modificada $|\det(LM_{m+l-1})|$ que é armazenado em DM ($DM \leftarrow |\det(LM_{m+l-1})|$).
5. Compare a solução atual (DM) com a melhor solução anterior (DM^{best}), se a solução atual for superior, ela é armazenada em DM^{best} ($DM^{best} \leftarrow DM$). Da mesma forma, a localização do ramo que deu origem a esta melhor solução é registrada em b , para posteriormente retirar o último ramo adicionado na posição $m + l$ do sistema (A^{m+l}_{m+l}).
6. Após testar a adição de cada ramo candidato de P , ao número total de ramos presentes no sistema A , escolhe-se o ramo (P^b_{n-l+1}) que maximiza o número de topologias radiais a serem incorporadas definitivamente para A_{m+j-1} , obtendo um vector definitivo A_{m+l} .
7. Repita este procedimento até que os melhores p ramos livres sejam adicionados ao sistema. Finalmente, é possível obter o sistema que é composto pela união dos m ramos iniciais mais os p ramos incorporados (A_{m+p}) juntamente com seu melhor número de topologias radiais correspondentes (DM^{best}).

Com as informações fornecidas acima é apresentada a Figura 5 que ilustra o funcionamento do AHC que foi aplicado ao problema de PESD. Assim, os P_s ramos candidatos a serem adicionados no sistema são representados na Figura 5 como n .

Figura 5 – Fluxograma do AHC aplicado ao problema de PESD



Fonte: Elaborada pela autora.

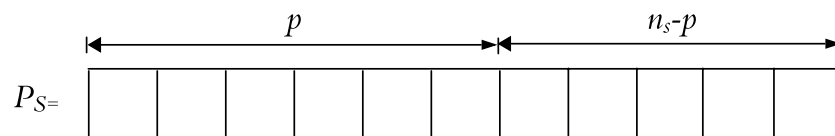
3.4 IDEALIZAÇÃO DA APLICAÇÃO DA META-HEURÍSTICA DE BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL

Para implementar a meta-heurística VNS ao problema de PESD considerando confiabilidade a estratégia geral é a seguinte:

1. Encontra-se a topologia radial ótima usando o modelo matemático do capítulo anterior resolvido usando um *solver*.
2. Adiciona-se um conjunto de p ramos adicionais para encontrar um sistema ligeiramente malhado de forma que o sistema malhado encontrado tenha o maior número de topologias radiais diferentes. O conjunto desses p ramos adicionais é encontrado usando a meta-heurística VNS nas versões VND e BVNS.

A tarefa mais importante na implementação de uma meta-heurística aplicada na solução de um problema específico é idealizar a forma de representar uma proposta de solução. Para o problema abordado usando o VND e BVNS a estrutura da proposta de solução idealizada é apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Idealização da forma de uma proposta de solução



Fonte: Elaborada pela autora.

Na forma de representação mostrada na Figura 6 o vetor P_S , que representa uma proposta de solução, tem n_s elementos. Os primeiros p elementos representam os ramos que devem ser construídos de acordo com a proposta de solução e os outros $n_s - p$ elementos representam os ramos que não devem ser construídos na proposta de solução. Assim, os elementos de P_S são os ramos candidatos à adição ou construção. Deve-se observar que podem existir várias formas de representar uma proposta de solução. Nesse contexto, a proposta mais eficiente é aquela que permite implementar de forma mais eficiente as seguintes tarefas:

1. Encontrar uma proposta de solução inicial.
2. Verificar a qualidade da proposta de solução (função objetivo).
3. Verificar se a proposta de solução é factível ou infactível.
4. Deve permitir idealizar estruturas de vizinhança e percorrer o espaço de busca.

5. Deve permitir realizar uma transição.

A metodologia apresentada para representar uma proposta de solução para implementar a segunda parte do problema da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica pode ser considerada eficiente. Assim, as tarefas mencionadas anteriormente podem ser implementadas da seguinte forma:

1. Pode-se encontrar uma proposta de solução inicial apenas ordenando, de forma aleatória, todos os ramos candidatos no vetor P_S .
2. A qualidade de proposta de solução, isto é, encontrar o número de topologias radiais existentes na proposta de solução pode ser encontrada calculando o determinante da matriz laplaciana modificada, isto é, para o grafo formado pela topologia radial e os ramos adicionados na proposta P_S . Esse processo gera o maior tempo de processamento no algoritmo VND proposto.
3. Para as estruturas de vizinhança sugeridas, toda proposta de solução vizinha é factível já que em toda proposta de solução vizinha existem p ramos adicionados como pode ser verificado nas estruturas de vizinhança sugeridas adiante.
4. De forma muito trivial podem ser idealizadas estruturas de vizinhança como são mostradas adiante.
5. Uma transição é realizada de forma trivial, passando da proposta de solução corrente para a nova proposta de solução.

No passo 1 do algoritmo VND, devem-se detalhar os seguintes aspectos:

- Deve-se representar uma proposta de solução de acordo com a metodologia apresentada na Figura 6.
- A função objetivo é o número de topologias radiais existentes na proposta de solução.
- Dessa forma, deve-se calcular o determinante da matriz laplaciana modificada do grafo da proposta de solução representada pela topologia radial, já encontrada e que permanece fixa, com os p ramos sugeridos pela proposta de solução P_S .
- Devem-se idealizar as estruturas de vizinhança. Sugerem-se as seguintes estruturas de vizinhança:
 1. Vizinhança N_1 : É vizinha da proposta de solução corrente toda proposta encontrada retirando um ramo cuja construção é sugerida na proposta de solução e adicionando a

construção de um ramo cuja construção não é sugerida na proposta de solução corrente. Em relação à proposta apresentada na Figura 6, isso significa trocar um elemento que se encontra dentre os p elementos por um elemento que se encontra dentre os $(n_s - p)$ últimos elementos.

2. Vizinhaça N_2 : A mesma estratégia do caso anterior, mas trocando dois elementos de cada conjunto.
3. Vizinhaça N_3 : A mesma estratégia do caso N_1 , mas trocando três elementos de cada conjunto.

No passo 2 do algoritmo VND, deve-se encontrar uma proposta de solução inicial. Inicialmente, essa proposta de solução inicial pode ser gerada de forma aleatória. Entretanto, pode ser mais eficiente idealizar um AHC para encontrar uma proposta de solução inicial de qualidade.

No passo 3 do algoritmo VND, deve-se encontrar a função objetivo (número de topologias radiais) para cada proposta de solução existente no nível de vizinhaça que está sendo analisado. Dessa forma, o passo 3 é o mais demorado do ponto de vista computacional já que deve ser calculado o determinante da matriz laplaciana modificada para cada proposta de solução vizinha. Os passos 5 e 6 do algoritmo VND são triviais. O algoritmo VND termina quando fracassa em encontrar uma proposta de solução vizinha no último nível de vizinhaça $N_{S_{max}}$. Dessa forma, não existe necessidade de especificar de forma explícita um critério de parada como acontece com outras meta-heurísticas.

3.5 APLICAÇÃO DA META-HEURÍSTICA DE BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL NA VERSÃO VND

O algoritmo VNS na versão VND ilustrado no fluxograma da Figura 7, parte da solução (x^b, FO^b) encontrada pelo AHC. Esta solução é armazenada no vetor binário, $xinc$, ($xinc \leftarrow x^b$) cuja função objetivo, que indica o número máximo de topologias radiais possíveis, está armazenada em $Finc$ ($Finc \leftarrow FO^b$). É fundamental destacar que, na busca pela melhoria da solução obtida pelo AHC, o número de ramos construídos deve ser mantido constante, portanto, a estratégia envolve a troca de ramos já construídos por aqueles que ainda não foram construídos. A seguir, apresenta-se a sequência de passos apresentada no algoritmo para refinar a solução inicial.

1. Inicialização: Inicialize o parâmetro S_{max} e de acordo com as preferências do usuário. Onde, S_{max} representa o nível máximo de vizinhaça ($S_{max} \leftarrow 3$), e o contador $neval$,

que começa em zero, registra o número da função objetivo avaliada, identificando em qual número o melhor valor foi gerado. Estabeleça o número total de ramos candidatos a construir ($n \leftarrow \beta$), armazene a função objetivo e o vetor que representa essa solução.

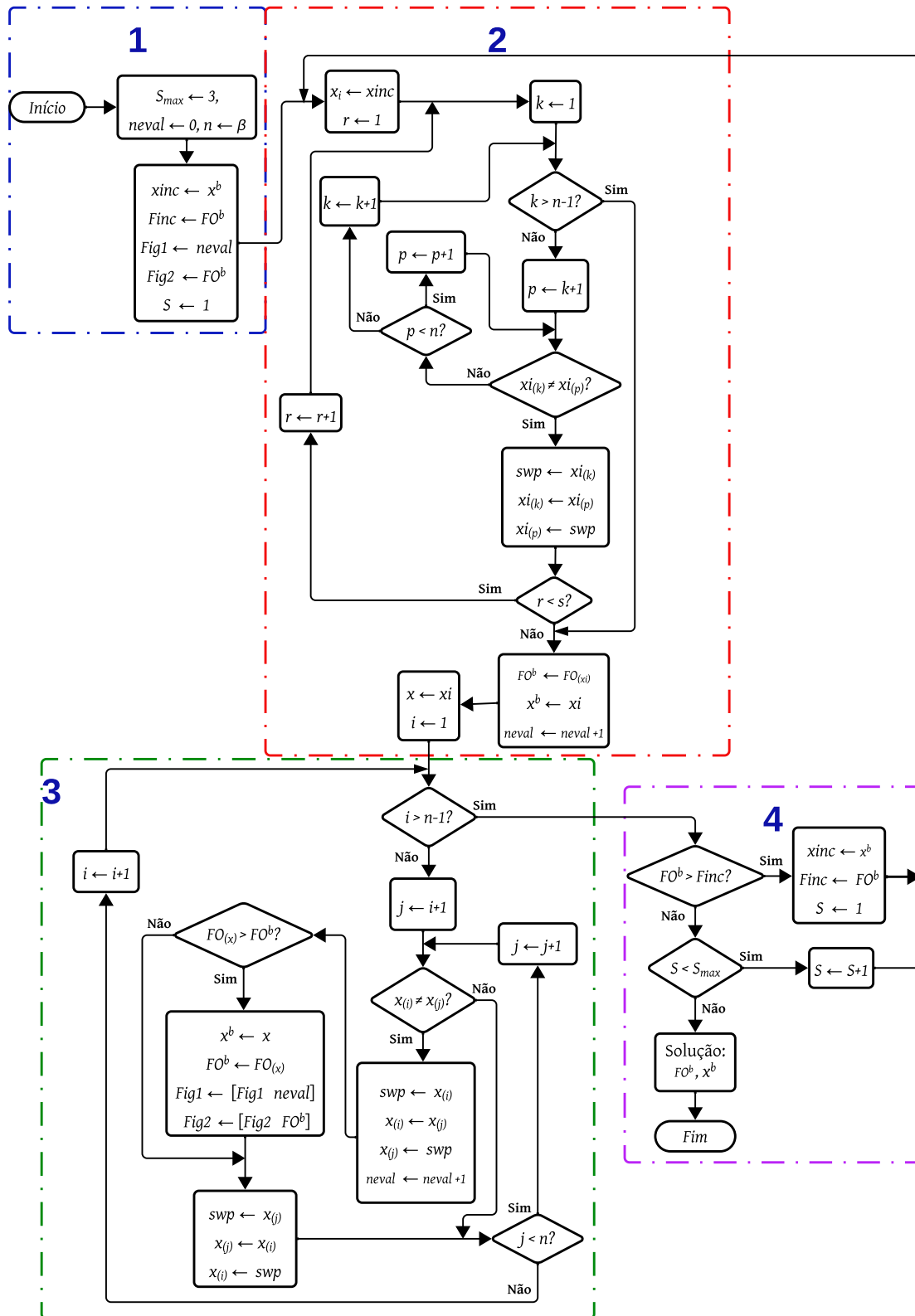
2. Exploração de estruturas de vizinhança: Nesta segunda etapa, depois que $xinc$ é armazenado em xi ($xi \leftarrow xinc$), k começa na posição 1 ($k \leftarrow 1$), e p em $k + 1$ ($p \leftarrow k + 1$). A proposta é perturbar a solução encontrada pelo AHC, em cada nível de vizinhança S , trocando um ramo construído por um não construído, o que envolve a troca de duas posições com valores diferentes no vetor binário. Esta operação é realizada de forma sequencial e ordenada, explorando para cada posição $k \in \{1, 2, 3, \dots, n - 1\}$ do vetor binário com todas as outras posições $p \in \{k + 1, \dots, n\}$. O processo se repete até que seja encontrado um par de posições com valores binários diferentes. Ao final desta fase, a função objetivo $FO_{(xi)}$ é avaliada neste novo vetor binário xi salvando os valores atualizados em FO^b e x^b .

No nível de vizinhança N_1 , a solução passa por uma única perturbação (troca de um ramo construído por um não construído). Na vizinhança N_2 , a solução é perturbada duas vezes simultaneamente, adicionando dois ramos e removendo dois ramos, para, posteriormente, determinar o número de topologias existentes nesse vetor. Finalmente, no nível de vizinhança N_3 , a solução é perturbada três vezes simultaneamente, adicionando três ramos e removendo três ramos da solução. Posteriormente, a função objetivo é avaliada, que consiste no número de topologias diferentes geradas pelo vetor encontrado.

3. Exploração dos vizinhos: O valor de xi é armazenado em x ($x \leftarrow xi$), i começa com a posição 1 ($i \leftarrow 1$), j com $i + 1$ ($j \leftarrow i + 1$). Duas soluções diferentes são trocadas ($x_{(i)} \neq x_{(j)}$). Se ($x_{(i)} = x_{(j)}$), então j move para a próxima posição ($j \leftarrow j + 1$). Após a troca de 2 posições diferentes, a função objetivo $FO_{(x)}$ é calculada e comparada com FO^b encontrada anteriormente ($FO_{(x)} > FO^b$). Se ($FO_{(x)} > FO^b$) for satisfeito, então o vetor binário que representa essa solução x é armazenado em x^b ($x^b \leftarrow x$) e $FO_{(x)}$ em FO^b ($FO^b \leftarrow FO_{(x)}$), caso contrário, vá para a próxima posição de j ($j \leftarrow j + 1$). Faça este procedimento até ($i \leq n - 1$).
4. Mover ou não: Quando ($i > n - 1$), então compare ($FO^b > Finc$). Se esta condição for atendida então x^b é armazenado no vetor binário $xinc$ ($xinc \leftarrow x^b$), o valor de FO^b é armazenado em $Finc$ ($Finc \leftarrow FO^b$) e retorna no nível de vizinhança N_1 ($S \leftarrow 1$). Se

$(FO^b > Finc)$ não for atendido, então pare o processo se $(S = S_{max})$, em caso contrário faça $(S \leftarrow S + 1)$ e execute novamente os passos 2, 3 e 4. Quando $(S = S_{max})$ o algoritmo termina e imprime a solução FO^b que representa o maior número de topologias encontradas e x^b o vetor que contém aqueles 6 ramos que representam essa melhor solução. O nível máximo de vizinhança utilizado neste trabalho é 3 ($S_{max} \leftarrow 3$).

Figura 7 – Fluxograma do algoritmo VNS na versão VND



Fonte: Elaborada pela autora.

3.6 APLICAÇÃO DA META-HEURÍSTICA DE BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL NA VERSÃO BVNS

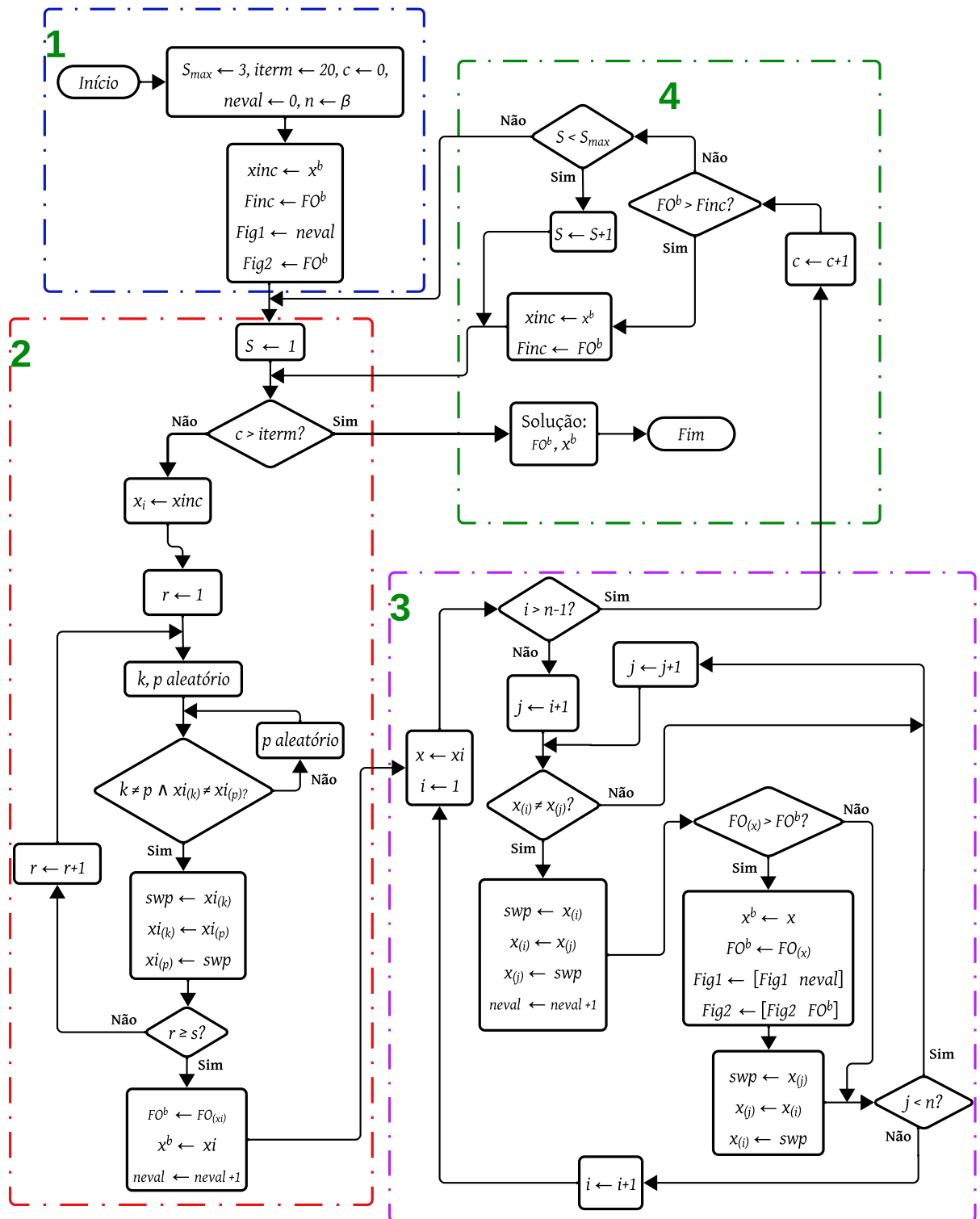
O algoritmo VNS na sua variante BVNS, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 8, inicia com a solução (x^b, FO^b) , gerada pelo AHC. Essa solução é registrada em um vetor binário $xinc$, ($xinc \leftarrow x^b$), onde a função objetivo que representa o número máximo de topologias radiais distintas é armazenada em $Finc$ ($Finc \leftarrow FO^b$). É fundamental destacar que durante todo o processo, deve-se manter constante o número de ramos candidatos para construção (6 ramos a serem adicionados ao sistema expandido). A seguir, é apresentada a sequência de passos a seguir.

1. **Inicialização:** Configure os parâmetros S_{max} , $neval$, $iterm$ e c de acordo com as especificações do usuário. Onde, S_{max} representa o nível máximo de vizinhança ($S_{max} \leftarrow 3$), $iterm$ indica o número máximo de iterações a serem executadas no algoritmo ($iterm \leftarrow 20$), c é o contador de iterações ($c \leftarrow 0$), e $neval$ o contador que registra quantas vezes a função objetivo foi avaliada ($neval \leftarrow 0$), especificando em qual avaliação foi obtido o melhor valor. Além disso, determine o número total de ramos candidatos para construção ($n \leftarrow \beta$), armazene a função objetivo e o vetor que representa essa solução.
2. **Agitação:** Nesta segunda etapa, o valor de $xinc$ é armazenado em xi ($xi \leftarrow xinc$). O valor de r indica o número de vezes que a solução vetorial é agitada, o que depende do nível da vizinhança. Inicialmente, para o nível de vizinhança N_1 , r é definido como 1 ($r \leftarrow 1$). Assim, a metodologia proposta consiste em agitar aleatoriamente os valores do vetor avaliado conforme o nível de vizinhança em que o processo de avaliação se encontra. Os valores de k e p são determinados aleatoriamente trocando posições de dois ramos com valores diferentes no vetor binário. Quando $(k \neq p \wedge xi_{(k)} \neq xi_{(p)})$, a função objetivo é avaliada e o resultado é armazenado em FO^b ($FO^b \leftarrow FO_{(xi)}$), enquanto o vetor desta solução é armazenado em x^b ($x^b \leftarrow xi$). Se esta condição não for satisfeita, um novo valor para p é gerado aleatoriamente. O processo continua até que seja encontrado um par de posições com valores binários diferentes, alterando a posição com valor 0 para 1 e a posição com valor 1 para 0.
3. **Busca local:** O valor de xi é armazenado em x ($x \leftarrow xi$), i começa com a posição 1 ($i \leftarrow 1$), j com $i + 1$ ($j \leftarrow i + 1$). Duas soluções diferentes são trocadas ($x_{(i)} \neq x_{(j)}$). Se $(x_{(i)} = x_{(j)})$, então j move para a próxima posição ($j \leftarrow j + 1$). Após a troca de 2

posições diferentes, a função objetivo $FO_{(x)}$ é calculada e comparada com FO^b encontrada anteriormente ($FO_{(x)} > FO^b$). Se ($FO_{(x)} > FO^b$) for satisfeito, então o vetor binário que representa essa solução x é armazenado em x^b ($x^b \leftarrow x$) e $FO_{(x)}$ em FO^b ($FO^b \leftarrow FO_{(x)}$), caso contrário, vá para a próxima posição de j ($j \leftarrow j + 1$). Faça este procedimento até ($i \leq n - 1$).

4. Mover ou não: Quando ($i > n - 1$), o contador aumenta em 1, então a função objetivo encontrada é comparada com a função objetivo inicial ($FO^b > Finc$). Se esta condição for atendida então x^b é armazenado no vetor binário $xinc$ ($xinc \leftarrow x^b$), o valor de FO^b é armazenado em $Finc$ ($Finc \leftarrow FO^b$) e retorna ao nível de vizinhança N_1 ($S \leftarrow 1$). Se ($FO^b > Finc$) não for atendido, então pare o processo se ($c = iterm$), em caso contrário faça ($S \leftarrow S + 1$) e execute novamente os passos 2, 3 e 4 até ($S \leq S_{max}$). Quando ($S \leq S_{max}$) o algoritmo retorna ao nível de vizinhança N_1 e executa os passos 2, 3 e 4. Este processo é repetido até que o número máximo de iterações seja atingido. Quando o contador c é igual ao número de iterações ($c = iterm$) o algoritmo termina e imprime a solução FO^b que representa o maior número de topologias encontradas e x^b o vetor que contém aqueles 6 ramos que representam essa melhor solução.

Figura 8 – Fluxograma do algoritmo VNS na versão BVNS



Fonte: Elaborada pela autora.

Em resumo, a proposta apresentada neste capítulo descreve uma abordagem inovadora destinada a maximizar o número de topologias radiais em um sistema de distribuição ligeiramente malhado. Em vez de depender exclusivamente de topologias radiais, a proposta sugere a inclusão de ramos que normalmente permanecem desligados, mas podem ser ligados durante falhas ou processos de manutenção, aumentando assim a confiabilidade e a capacidade de resposta do sistema de distribuição de energia elétrica. A aplicação do AHC e da meta-heurística VNS (nas suas variantes VND e BVNS) permitem a identificação de ramos adicionais que devem ser construídos para maximizar o número de topologias radiais possíveis.

4 TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para o problema de PESD aplicado a um sistema de 54 barras. Na primeira etapa de planejamento, o modelo proposto foi implementado na linguagem de modelagem matemática AMPL e o modelo matemático de PCSOBM foi resolvido utilizando o *solver* CPLEX versão 12.8. Na segunda etapa de planejamento, os resultados do AHC e da meta-heurística VNS em suas versões VND e BVNS foram obtidos utilizando o MATLAB. No teste foi utilizado um computador com processador Intel® Core™ i7-8700 de 3,20 GHz e 16 GB de RAM.

4.1 PRIMEIRA FASE: APLICANDO O PLANEJAMENTO TRADICIONAL

4.1.1 Sistema de distribuição de 54 barras

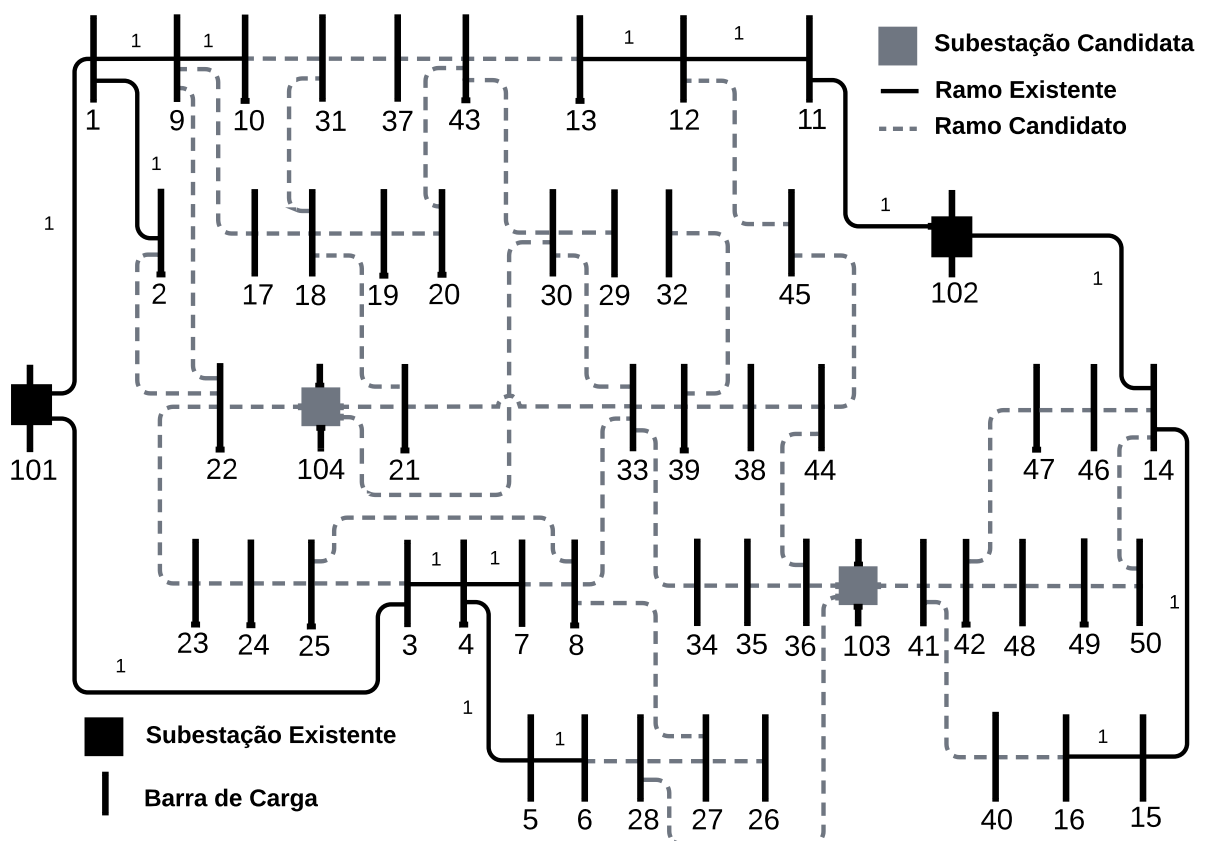
O sistema original de 54 barras é apresentado em várias fontes Lavorato (2010), Franco, Rider e Romero (2014), Franco *et al.* (2013) e Sousa *et al.* (2011). No modelo apresentado são consideradas no planejamento da rede de distribuição quatro subestações, sendo duas já existentes (101 e 102) com eventuais possibilidades de expansão e duas subestações propostas para construção (103 e 104) (Miranda; Ranito; Proenca, 1994). Adicionalmente, são considerados 15 ramos existentes, junto com 46 rotas viáveis para construção de novos ramos, envolvendo quatro diferentes tipos de condutores. Dada a simplicidade desse problema em relação à proposta apresentada, o sistema foi modificado. Assim, nos testes, foram adicionadas 8 novas rotas viáveis a fim de aumentar a complexidade do problema e tornar a fase 2 mais interessante. O sistema modificado é apresentado na Figura 9 e na Tabela 1. Os últimos 8 ramos apresentados na Tabela 1 são os ramos adicionados.

Para satisfazer a exigência do sistema, é essencial que o sistema de distribuição amplie sua capacidade e se expanda para garantir a prestação de um serviço de qualidade superior aos seus consumidores. Nesse sentido, o sistema de 54 barras (Lavorato, 2010) foi modificado para possibilitar a transferência de carga. O sistema atual é alimentado por duas subestações (101 e 102) com potência instalada e tensão nominal de 16,7 MVA e 13,5 kV, respectivamente, destinando-se a abastecer um total de 50 barras de carga. Os valores mínimo e máximo para magnitudes de tensão situam-se em 0,95 p.u. e 1,0 p.u respectivamente. No cenário atual, ambas as subestações estão operando com capacidade máxima, mas poderiam ser reforçadas adicional-

mente com a mesma capacidade. Neste sentido, é indispensável planejar o reforço e a construção de novas subestações através da construção de novos ramos, respeitando a restrição de radialidade.

O plano de expansão propõe a construção de novos ramos nas rotas viáveis, cada uma com seu respectivo tipo de condutor, que determinará a corrente máxima suportada pelo ramo, conforme ilustrado na Figura 9. Adicionalmente, é necessário ser considerada a possibilidade de construção das futuras subestações (103 e 104), com capacidade de 22 MVA para cada uma, e seus respectivos custos de implementação.

Figura 9 – Sistema de 54 barras – Configuração inicial e rotas factíveis propostas



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 9, mostra-se a existência de um grafo conexo no sistema inicial, onde as linhas pontilhadas indicam possíveis novos ramos a serem construídos e as linhas contínuas indicam ramos existentes com seus respectivos tipos de condutor, que podem ser recondutores. Os quadrados de cor cinza indicam as futuras subestações que podem ser construídas após o planejamento e os quadrados pretos representam as subestações existentes.

Tabela 1 – Topologia base

Número de ramo	<i>i</i>	<i>j</i>	Tipo de condutor	Número de ramo	<i>i</i>	<i>j</i>	Tipo de condutor
1	1	101	1	36	37	43	0
2	3	101	1	37	31	37	0
3	4	3	1	38	10	31	0
4	7	4	1	39	43	13	0
5	5	4	1	40	45	12	0
6	8	7	0	41	44	45	0
7	6	5	1	42	38	44	0
8	9	1	1	43	39	38	0
9	2	1	1	44	32	39	0
10	10	9	1	45	33	39	0
11	14	102	1	46	8	33	0
12	15	14	1	47	34	33	0
13	16	15	1	48	35	34	0
14	11	102	1	49	36	35	0
15	12	11	1	50	36	103	0
16	13	12	1	51	28	103	0
17	20	19	0	52	41	103	0
18	19	18	0	53	40	41	0
19	18	17	0	54	16	40	0
20	17	9	0	55	42	41	0
21	21	18	0	56	48	42	0
22	21	104	0	57	49	48	0
23	22	104	0	58	50	49	0
24	22	9	0	59	47	42	0
25	23	22	0	60	46	47	0
26	24	23	0	61	14	46	0
27	25	24	0	62	18	31	0
28	8	25	0	63	20	43	0
29	27	8	0	64	2	22	0
30	26	27	0	65	30	33	0
31	28	27	0	66	21	33	0
32	28	6	0	67	36	44	0
33	30	104	0	68	25	3	0
34	29	30	0	69	50	14	0
35	43	30	0				

Fonte: Adaptado de Lavorato (2010)

Na Tabela 1 mostram-se detalhadamente os dados do sistema inicial, onde se pode verificar que existem 15 ramos construídos e 54 rotas viáveis para construção de novos ramos, formando um total de 69 ramos. Referente ao tipo de condutor mostrado na Tabela 1, o valor '1'

significa que todos os ramos existentes na topologia base são de condutor tipo '1', e o valor '0' significa que não existe condutor nem ramo construído na topologia base.

4.1.2 Topologia base

Na Tabela 2 são apresentados 4 tipos de condutores como parte da proposta de planejamento, acompanhados de suas respectivas especificações técnicas de limites máximos de corrente, reatância e resistência, cada um com sua unidade de medida correspondente. Além disso, nota-se que a reatância e a resistência diminuem à medida que o tipo de condutor aumenta.

Tabela 2 – Especificações técnicas dos tipos de condutores

a (Tipo de condutor)	\bar{I}_a (A)	R_a (Ω /km)	X_a (Ω /km)
1	150	0,3655	0,2520
2	250	0,2921	0,2466
3	350	0,2359	0,2402
4	450	0,1932	0,2279

Fonte: (Macedo; Romero, 2016)

Na Tabela 3 são apresentados os custos de construção e recondutoramento de ramos em KUSD/km, referentes a cada tipo de condutor. Dessa forma, o parâmetro t_{ij} assume valores de 0 ou 1, onde $t_{ij} = 0$ representa a inexistência de um ramo construído entre as barras i e j e, portanto, o ramo a ser construído dependerá do tipo de condutor utilizado, enquanto $t_{ij} = 1$ significa a presença de um ramo construído entre as barras i e j , ao qual será feito o recondutoramento para instalar um novo condutor. O custo de cada ramo a ser instalado depende da bitola do condutor que será utilizado.

Tabela 3 – Custos de construção e recondutoramento de ramos

			Custo para condutor de tipo a (KUSD/km)			
			1	2	3	4
Ramo existente	(t_{ij})	0	30	35	42	46
		1	0	34	41	44

Fonte: (Macedo; Romero, 2016)

Por último, a Tabela 4 apresentam-se os custos associados ao reforço e construção de subestações, detalhando tanto capacidade instalada atual quanto a capacidade prevista para as futuras subestações a serem construídas e reforçadas. As subestações 101 e 102 já existentes possuem uma capacidade inicial de 16,7 MVA cada uma, podendo ser reforçadas com a mesma capacidade ao custo de 1,0 MUSD por subestação. Para a construção das subestações nas barras 103 e 104 são necessários 2,0 MUSD e 2,4 MUSD respectivamente, tendo cada subestação capacidade de 22 MVA.

Tabela 4 – Dados de subestações

Subestação	Cap. instalada (\bar{S}_i) (MVA)	Reforço da cap. instalada (S_i^{gn}) (MVA)	Custo de construção (C_i^s) (MUSD)	Custo de reforço (C_i^s) (MUSD)
101	16,70	16,70	-	1,00
102	16,70	16,70	-	1,00
103	-	22,00	2,00	-
104	-	22,00	2,40	-

Fonte: (Macedo; Romero, 2016)

Os dados sobre barras e ramos do sistema são mostrados nas Tabela 21 e Tabela 22, respectivamente. Ambos são apresentados no Apêndice A.

4.1.3 Resultados do planejamento da expansão em sistemas de distribuição

Após a conclusão da fase inicial do planejamento, os resultados obtidos foram os seguintes: Após a execução do plano de expansão, dos ramos potenciais para a construção, 36 ramos foram instalados, enquanto 19 não foram construídos na rede. Os dados apresentados na Tabela 5 mostram que, dos 15 ramos existentes no sistema inicial, um foi excluído e 3 foram submetidos a um processo de recondutoramento. Adicionalmente, as subestações 103 e 104 foram instaladas e não foram reforçadas as subestações 101 e 102. Cada um dos novos ramos construídos e aqueles sujeitos ao recondutoramento são descritos juntamente com o tipo de condutor utilizado. Nesta tabela também se exhibe o custo de cada ramo instalado, variando conforme o tipo de condutor usado e a existência prévia do ramo no sistema inicial. Os ramos que não foram construídos figuram na tabela com valor de condutor igual a 0, o que indica a ausência de um ramo construído. Esses ramos não instalados na primeira fase serão usados em avaliações adicionais para aumentar a confiabilidade do sistema expandido.

No plano de expansão do SDEE utiliza-se quatro tipos de condutores, com diferentes capacidades de corrente cada um. Na Figura 10 ilustram-se as informações apresentadas na Tabela 5.

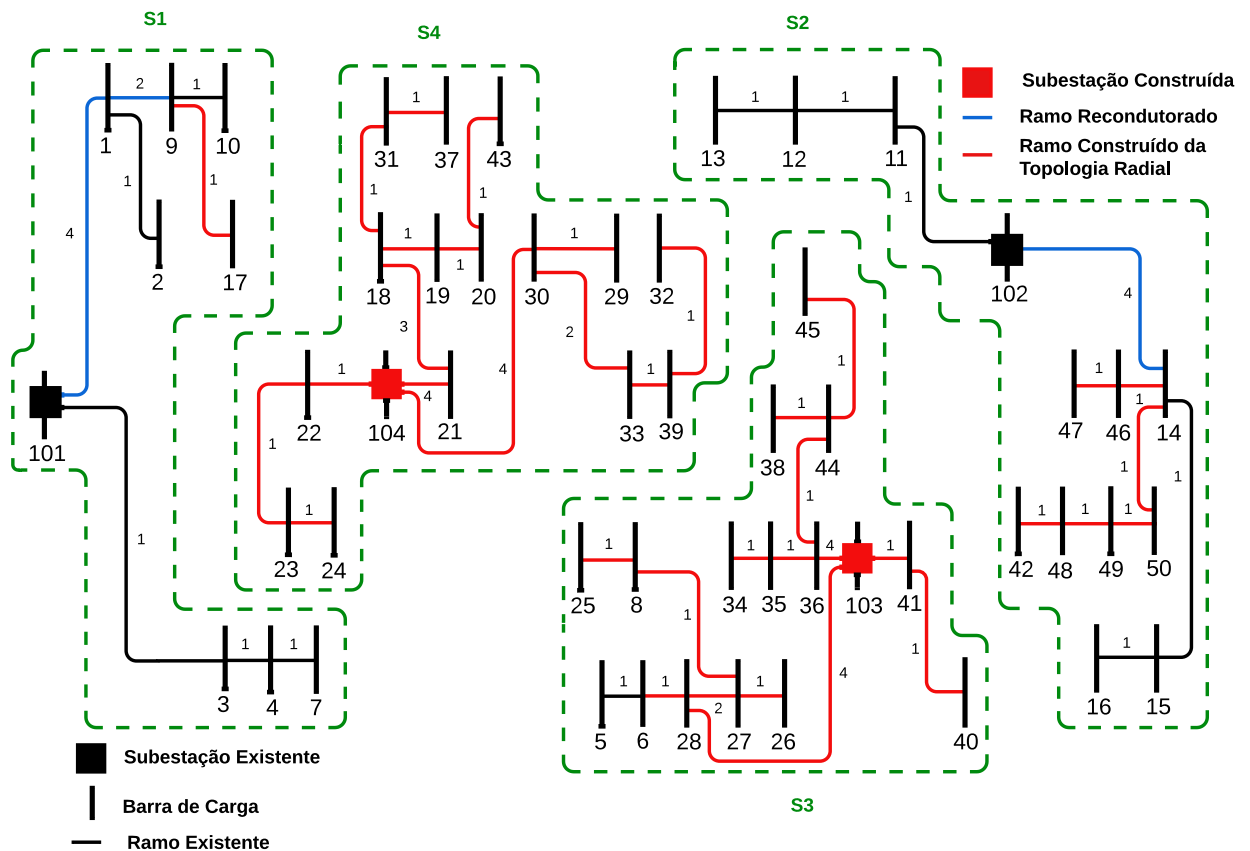
Tabela 5 – Topologia radial expandida

Número de Ramo	<i>i</i>	<i>j</i>	Tipo de condutor	Custo (USD)	Número de Ramo	<i>i</i>	<i>j</i>	Tipo de condutor	Custo (USD)
1	1	101	4	12 364	36	37	43	0	0,000
2	3	101	1	0,000	37	31	37	1	5 610
3	4	3	1	0,000	38	10	31	0	0,000
4	7	4	1	0,000	39	43	13	0	0,000
5	5	4	0	0,000	40	45	12	0	0,000
6	8	7	0	0,000	41	44	45	1	6 540
7	6	5	1	0,000	42	38	44	1	9 360
8	9	1	2	11 662	43	39	38	0	0,000
9	2	1	1	0,000	44	32	39	1	12 180
10	10	9	1	0,000	45	33	39	1	8 430
11	14	102	4	16 500	46	8	33	0	0,000
12	15	14	1	0,000	47	34	33	0	0,000
13	16	15	1	0,000	48	35	34	1	6 540
14	11	102	1	0,000	49	36	35	1	6 540
15	12	11	1	0,000	50	36	103	4	11 500
16	13	12	1	0,000	51	28	103	4	14 352
17	20	19	1	9 360	52	41	103	1	9 360
18	19	18	1	7 500	53	40	41	1	11 250
19	18	17	0	0,000	54	16	40	0	0,000
20	17	9	1	12 900	55	42	41	0	0,000
21	21	18	3	13 104	56	48	42	1	7 500
22	21	104	4	11 500	57	49	48	1	11 250
23	22	104	1	11 250	58	50	49	1	6 540
24	22	9	0	0,000	59	47	42	0	0,000
25	23	22	1	10 290	60	46	47	1	9 360
26	24	23	1	8 430	61	14	46	1	10 290
27	25	24	0	0,000	62	18	31	1	6 540
28	8	25	1	8 430	63	20	43	1	9 360
29	27	8	1	11 250	64	2	22	0	0,000
30	26	27	1	10 290	65	30	33	2	8 750
31	28	27	2	10 920	66	21	33	0	0,000
32	28	6	1	15 000	67	36	44	1	8 430
33	30	104	4	12 926	68	25	3	0	0,000
34	29	30	1	9 360	69	50	14	1	5 610
35	43	30	0	0,000					

Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 10 ilustra-se o resultado da topologia do sistema expandido. As 36 linhas vermelhas representam os novos ramos construídos, as linhas pretas representam os ramos existentes no sistema inicial, e as 3 linhas azuis indicam os ramos em que foi aplicado o recondu-toramento. No sistema inicial, existiam 15 ramos, mas um deles foi excluído durante o processo de solução do problema. As novas subestações construídas são representadas por quadrados vermelhos, enquanto os quadrados pretos representam as subestações existentes no sistema ini-cial e que não foram reforçadas. O sistema final mostra a existência de quatro subsistemas ra-diais que surgiram a partir do planejamento, e cada ramo tem o seu próprio tipo de condutor.

Figura 10 – Sistema de 54 barras – Resultado



Fonte: Elaborado pela autora.

O processo de otimização encontrou uma solução ótima para o sistema, com um custo total de planejamento de 4.788.328 USD, incluindo custos de construção e recondu-toramento de ramos, no valor de 388.328 USD, e o custo de construção de subestações, de 4.400.000 USD. O esforço computacional, referente ao tempo utilizado para resolver este problema, foi de 34,22 segundos. Na Tabela 6 apresentam-se os custos obtidos pelo modelo.

Tabela 6 – Custo do planejamento

	Custos (USD)
Função objetivo:	4.788.328
Ramos:	388.328
Subestações:	4.400.000

Fonte: Elaborado pela autora.

Na Tabela 7, apresentam-se os resultados da potência fornecida pelas SE. As subestações 101 e 102, que operam com 13,24 e 13,55 MVA respectivamente, não requerem reforço, pois não utilizam totalmente sua capacidade instalada de 16,7 MVA cada uma. As subestações 103 e 104 foram construídas com capacidade máxima de 22 MVA cada uma, e atualmente operam com 17,43 MVA e 21,40 MVA, respectivamente.

É possível também notar quanta potência ativa e reativa é injetada pela subestação, o valor total de perdas, a demanda de potência ativa e reativa obtida, e o estado da subestação indicado pelo valor da variável binária w_i : 0 para ausência de construção ou expansão, e 1 caso contrário.

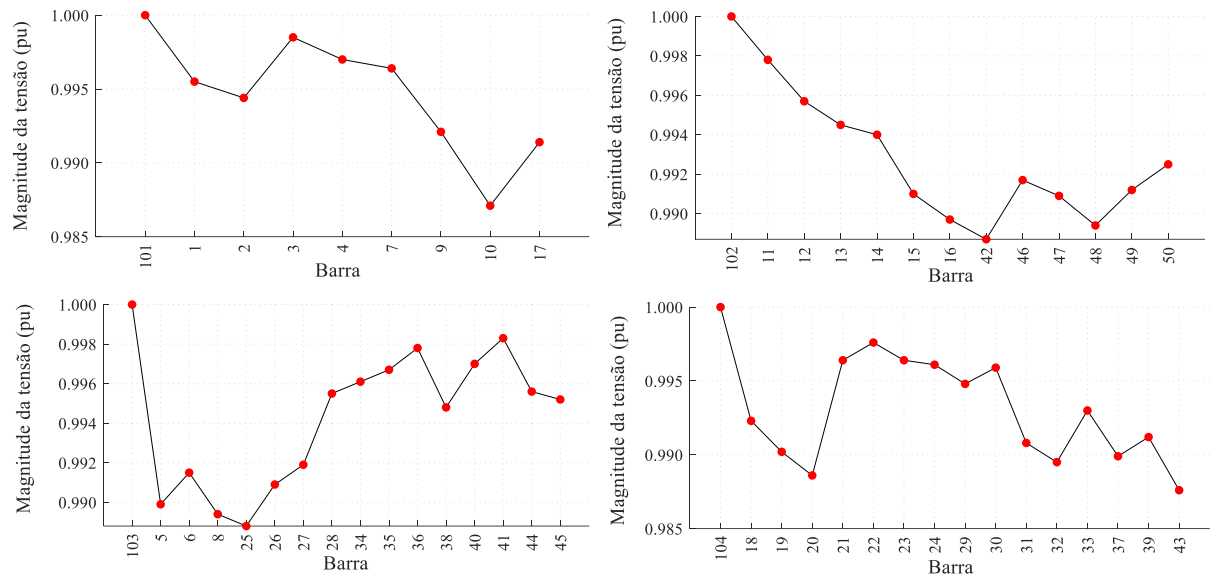
Tabela 7 – Potência fornecida das subestações

subestações	Ativa (MW)	Reativa (MVar)	Aparente (MVA)	w_i
101	11,56	6,45	13,24	0
102	11,83	6,61	13,55	0
103	15,22	8,49	17,43	1
104	18,69	10,44	21,40	1
Total potência	57,30	31,99		
Perdas	0,46	0,41		
Demanda	56,84	31,58		

Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 11 apresentam-se as tensões a quatro subsistemas radiais formados após o planejamento, cada um vinculado a uma subestação existente no sistema. Também é possível observar a quantidade de barras presentes em cada subsistema formado, assim como os valores das tensões, que se encontram entre os limites mínimo e máximo permitidos, de 0.95 pu a 1 pu.

Figura 11 – Magnitudes de tensão dos subsistemas radiais formados após o planejamento



Fonte: Elaborado pela autora.

Em resumo, nesta fase inicial, inicia-se o planejamento com um sistema composto por duas subestações, com capacidades instaladas de 16,7 MVA e 15 ramos existentes utilizando condutores tipo 1. Com o planejamento através do modelo matemático PCSOBM, identifica-se a solução mais econômica, que não requereu reforço nas subestações. As duas subestações originais passaram a operar com 13,24 MVA e 13,55 MVA, respectivamente. Decidiu-se, também, pela construção de duas novas subestações operando com 17,43 MVA e 21,44 MVA, ambas abaixo de suas capacidades instaladas de 22 MVA.

Além disso, dos ramos existentes, determinou-se que três fossem reconduzidos, um fosse excluído e o restante permanecesse inalterado. Dos 54 ramos planejados para construção, 35 foram efetivamente construídos, cada um com seus respectivos tipos de condutores, enquanto 19 deles não chegaram a ser construídos. Ressalta-se que este método permitiu otimizar custos e garantir a operação eficaz do sistema ao escolher a opção mais econômica, destacando os 19 ramos que estavam previstos para construção, mas que não foi necessário. Esses 19 ramos não construídos são aproveitados para o início da segunda fase dos resultados, que irá adicionar confiabilidade do sistema.

4.2 SEGUNDA FASE: APLICANDO O AHC E VNS

O processo de implementação da segunda fase começa a partir da topologia radial encontrada na primeira fase. Utilizando os ramos não construídos anteriormente, são selecionados

novos ramos para integrar o processo de otimização. Esses novos ramos são adicionados à topologia radial existente, permanecendo desligados durante a operação normal. O conjunto de ramos construídos forma uma rede ligeiramente malhada, gerando uma diversidade de topologias radiais. A maximização do número de topologias radiais utilizando o método de grafos no sistema de expansão de distribuição, previamente discutido e explicado no capítulo anterior, resulta em um aumento significativo no desempenho e, conseqüentemente, na confiabilidade.

Inicialmente, o máximo número de topologias radiais foi encontrado por meio da aplicação de um AHC com o intuito de alcançar uma solução de boa qualidade, para então aprimorá-la utilizando a meta-heurística VNS em suas variantes VND e BVNS.

4.2.1 Resultados do algoritmo heurístico construtivo

A solução inicial para o problema é encontrada através da implementação de um AHC, que realiza um processo iterativo e gera uma solução de boa qualidade para o sistema. O indicador de sensibilidade utilizado no processo permite identificar cada componente adicionado à solução em construção. Além disso, encontra o maior número de topologias radiais existentes no grafo do sistema de distribuição expandido.

Os 19 ramos candidatos adicionais a serem construídos estão localizados conforme mostrado na Tabela 8. Cada um deles é examinado durante as iterações do AHC, onde, a posição em que cada ramo está localizado indica qual deles, quando incorporado ao sistema, gera o maior número de topologias radiais possíveis e, portanto, é adicionado na solução em construção.

Tabela 8 – Ramos não construídos

Número	Posição	Ramo	Número	Posição	Ramo
1	5	5 - 4	11	43	39 - 38
2	6	8 - 7	12	46	8 - 33
3	19	18 - 17	13	47	34 - 33
4	24	22 - 9	14	54	16 - 40
5	27	25 - 24	15	55	42 - 41
6	35	43 - 30	16	59	47 - 42
7	36	37 - 43	17	64	2 - 22
8	38	10 - 31	18	66	21 - 33
9	39	43 - 13	19	68	25 - 3
10	40	45 - 12			

Fonte: Elaborado pela autora.

No processo de avaliação, o vetor inicial não contém nenhum ramo incorporado, conforme mostrado na Tabela 9; portanto, todos os valores são zero. Isso significa que o ponto de partida da análise considera um conjunto completamente vazio. Esse vetor inicial serve como base para a inclusão gradual de novos componentes durante o processo de otimização. À medida que novos ramos são incorporados, os valores no vetor começam a mudar, refletindo as adições feitas e permitindo a avaliação do impacto de cada novo ramo no desempenho geral das topologias radiais do sistema.

Tabela 9 – Vetor inicial

Posição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Vetor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Elaborado pela autora.

Mediante iterações do AHC, ramos adicionais são estrategicamente adicionados, representados por valores de 1 em vermelho, que indicam a posição e o ramo que está sendo incorporado à solução em construção. Os valores de 1 em preto, representam os ramos adicionados à solução em processo, juntamente com o novo ramo encontrado, conforme ilustrada na Tabela 10, visando maximizar o número de topologias radiais possíveis. Este método possibilita a avaliação e adição otimizada de ramos, resultando em um vetor binário final que reflete melhorias na resiliência e na confiabilidade do sistema. Dessa forma, o sistema se torna mais apto a reagir eficazmente a falhas ou necessidades de manutenção, elevando sua confiabilidade global.

Tabela 10 – Posição dos ramos candidatos no vetor

Ramo	Posição																			FO (ntr)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
2	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	72
3	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	504
4	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	3.528
5	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	23.128
6	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	135.877

Fonte: Elaborado pela autora.

Na Tabela 8 mostram-se os 19 ramos não construídos na fase inicial, entre os quais 6 foram selecionados e integrados ao processo de otimização. Na Tabela 11 apresenta-se a se-

quência desses ramos que foram adicionados no sistema e o número de topologias radiais encontradas em cada iteração. Esses ramos adicionados permanecem desligados durante a operação normal, mas podem ser ativados em condições atípicas, ou seja, em caso de falhas ou manutenções na rede. O tempo de CPU consumido para processar a implementação computacional desse algoritmo foi de 0,15 segundos.

Tabela 11 – Ramos adicionados AHC

Iteração	1	2	3	4	5	6
	43 - 13	43 - 13	43 - 13	43 - 13	43 - 13	43 - 13
	-	25 - 24	25 - 24	25 - 24	25 - 24	25 - 24
Ramo	-	-	42 - 41	42 - 41	42 - 41	42 - 41
	-	-	-	39 - 38	39 - 38	39 - 38
	-	-	-	-	10 - 31	10 - 31
	-	-	-	-	-	5 - 4
<i>FO(ntr)</i>	9	72	504	3.528	23.128	135.877

Fonte: Elaborado pela autora.

A solução encontrada com a aplicação do AHC mostra que o sistema expandido pode operar com um total de 135.877 topologias radiais diferentes. Assim, na primeira iteração, o ramo que encontra o maior número de topologias radiais é 43 – 13 com total de $ntr = 9$, na segunda iteração o ramo 25 -24 com $ntr = 72$, na terceira iteração o ramo 42 – 41 com $ntr = 504$, na quarta iteração o ramo 39 – 38 com $ntr = 3.528$, na quinta iteração o ramo 10 – 31 com $ntr = 23.128$ e finalmente na sexta iteração o ramo 5 – 4 com $ntr = 135.877$. Destacando-se que, durante o processo iterativo, o ramo anterior que apresenta maior número de topologias radiais é adicionado à solução em construção, aumentando progressivamente o número de topologias radiais possíveis no sistema. Este aumento significativo no número de topologias radiais (ntr) ao longo das iterações indica uma melhoria no desempenho e na confiabilidade do sistema de distribuição expandido.

Tabela 12 – Ordem dos ramos adicionados

Ordem	9	5	15	11	8	1
Ramo	43 - 13	25 - 24	42 - 41	39 - 38	10 - 31	5 - 4

Fonte: Elaborado pela autora.

Na Tabela 12 apresenta-se a sequência de inclusão dos 6 ramos, enquanto a Tabela 13 mostra suas posições no vetor final. Esses ramos permitem a criação de rotas alternativas para

o fluxo de energia, mitigando a vulnerabilidade às falhas e aprimorando a resiliência do sistema de distribuição de energia.

Tabela 13 – Posição dos ramos adicionados

Posição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Vetor	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0

Fonte: Elaborado pela autora.

O vetor final resultante do AHC, apresentado na Tabela 13, indica a posição dos ramos que são adicionados à solução em construção (1 = construído, 0 = não construído). Este vetor não apenas fornece uma solução inicial de alta qualidade, mas também estabelece uma base sólida para otimização subsequente usando a meta-heurística VNS em suas versões VND e BVNS. A utilização do vetor inicial gerado pelo AHC permite que o processo de VNS explore mais eficientemente o espaço de soluções, levando a uma melhoria contínua da solução.

4.2.2 Resultados da meta-heurística VNS na versão VND

Como o AHC já gerou o grupo de 6 ramos, a estratégia da meta-heurística VNS, em sua versão VND, é trocar ramos selecionados por outros que não foram escolhidos pelo AHC, buscando encontrar uma solução melhor do que a obtida pelo AHC. Desse modo, o VND busca identificar os 6 ramos que representem o maior número de topologias radiais diferentes. Assim, a meta-heurística VNS, em sua versão VND, inicia com a solução encontrada pelo AHC e busca uma solução superior à já obtida, a qual totaliza 135.877 topologias radiais diferentes. Na Tabela 14 apresenta-se a solução inicial proposta juntamente com os ramos candidatos para sua construção; os selecionados são mostrados em vermelho, enquanto os não escolhidos são mostrados em preto.

Tabela 14 – Ramos candidatos a serem construídos

Ramo	5 - 4	8 - 7	18 - 17	22 - 9	25 - 24	43 - 30	37 - 43	10 - 31	43 - 13	45 - 12
	39 - 38	8 - 33	34 - 33	16 - 40	42 - 41	47 - 42	2 - 22	21 - 33	25 - 3	

Fonte: Elaborado pela autora.

Na Tabela 15 são apresentados os resultados obtidos após a implementação do algoritmo VNS-VND, detalhando as descobertas feitas até chegar a uma estrutura de vizinhança N_3 . Inicialmente, parte-se de um vetor binário de 19 posições que inclui os ramos que melhoram a

confiabilidade do sistema encontrados no AHC, com uma FO de 135.877. Em seguida, são explorados todos os vizinhos no nível de vizinhança N_1 , onde durante esta estrutura de vizinhança, é identificado outro vetor com o mesmo valor para a FO, indicando que não há melhorias na função objetivo (ST - sem transição). No segundo nível de vizinhança, N_2 , consegue-se aumentar o valor da FO para 138.768, representado na tabela como uma transição (T). Uma vez que a FO foi melhorada na vizinhança N_2 , seguindo os princípios do VND, retorna-se ao nível de vizinhança N_1 . Após não encontrar melhorias nas estruturas de vizinhança N_1 , N_2 e N_3 , tanto o vetor binário de solução quanto o valor da FO permanecem inalterados, representados na tabela como ST. O tempo de CPU consumido pela implementação computacional desse algoritmo foi de 1,56 segundos.

Tabela 15 – Posição do ramo no vetor solução VND

S	Posição do ramo no vetor solução (x_b)																			FO (ntr)	Transição
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19		
AHC	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	135.877	-
N_1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	135.877	ST
N_2	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	138.768	T
N_1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	138.768	ST
N_2	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	138.768	ST
N_3	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	138.768	ST

Fonte: Elaborado pela autora.

Na Tabela 16 exibe-se o vetor binário correspondente à solução obtida pela meta-heurística VNS em sua versão VND.

Tabela 16 – Posição dos ramos solução VND

Posição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Vetor	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0

Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 17 apresenta os 6 melhores ramos que ocupam essas posições e geram o maior número de topologias radiais diferentes.

Tabela 17 – Ramos adicionados solução VND

Posição	5	8	9	11	14	16
Ramo	25 - 24	10 - 31	43 - 13	39 - 38	16 - 40	47 - 42

Fonte: Elaborado pela autora.

Finalmente, pode-se concluir que a meta-heurística VNS em sua versão VND encontra uma solução superior à obtida pelo AHC. A solução final alcançada abrange 138.768 topologias radiais diferentes, o que indica que o sistema expandido, juntamente com os ramos adicionais construídos, oferece maior confiabilidade do que o sistema resultante da aplicação do AHC. Quanto maior o número de diferentes topologias radiais encontradas, maior será a confiabilidade do sistema; uma vez que os ramos adicionais construídos no sistema expandido, que em condições normais permanecem desconectados, podem entrar em operação e fornecer energia a uma parte do sistema afetado por falhas ou trabalhos de manutenção.

4.2.3 Resultados da meta-heurística VNS na versão BVNS

A meta-heurística VNS, em sua variante BVNS, conforme mostrado na Tabela 18 e na Figura 12, assim como o VND, foca-se em aprimorar a solução gerada a partir do vetor binário obtido pelo AHC. Na Tabela 18, apresenta-se apenas uma fração dos resultados alcançados com essa abordagem BVNS, com o objetivo didático de ilustrar o progresso do algoritmo sob diferentes circunstâncias previamente discutidas na parte teórica.

O processo inicia assumindo como solução corrente aquela encontrada pelo AHC, para então inicializar o nível de vizinhança em 1 (N_1). No N_1 , a solução corrente é agitada, variando conforme o nível de vizinhança em que se encontra. No caso de N_1 , isso envolve retirar aleatoriamente um dos 6 ramos existentes e introduzir outro não existente também aleatoriamente. Com este novo vetor binário resultante da agitação, a FO é avaliada, sendo registrado FO = 60.123. Os valores de FO obtidos após cada agitação inicial, conforme se muda o nível de vizinhança (N_1 , N_2 e N_3 na Tabela 18), iniciam um processo de busca local interna que avalia todas as soluções vizinhas do vetor gerado pela agitação. Devido à natureza aleatória da agitação, abre-se a possibilidade de explorar novas regiões durante a busca local, geralmente começando com valores subótimos (Tabela 18: avaliações (N°) iniciais de FO: 1, 158, 393, 550 e 785, com valores de FO: 60.123, 91.273, 75.509, 88.830 e 74.100, respectivamente) que melhoram ao longo da exploração até atingir valores máximos ao final (N° : 58, 245, 417, 637 e 1016, com valores finais de FO: 135.877, 138.768, 138.768, 138.768 e 138.768). É importante

notar que na coluna "Obs" da Tabela 18, quando a FO melhora em relação à solução corrente, é indicada como "transição (T)", caso contrário, é rotulada como "sem transição (ST)".

Considerando que tanto a agitação quanto a busca local ocorrem dentro de um nível específico de vizinhança, se o melhor valor da FO encontrado naquela região não supera os melhores valores das regiões previamente exploradas, incrementa-se o nível de vizinhança em uma unidade (como apresentado na Tabela 18: N° 158, 550 e 785 implicam um aumento no nível de vizinhança); caso contrário, se há melhoria, retorna-se à vizinhança N_1 (observe o nível de vizinhança iniciando em N° 393).

Tabela 18 – Posição do ramo no vetor solução BVNS

	N°	Posição do ramo no vetor solução (x_b)																		FO (<i>ntr</i>)	Obs	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			19
AHC	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	135.877	-
	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	60.123	Agitação
	5	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	64.148	ST
N_1	7	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	86.093	ST
	43	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	101.332	ST
	58	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	135.877	ST
	158	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	91.273	Agitação
N_2	162	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	99.533	ST
	190	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	135.877	ST
	245	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	138.768	T
	393	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	75.509	Agitação
N_1	394	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	135.877	ST
	417	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	138.768	ST
	550	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	88.830	Agitação
N_2	556	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	105.840	ST
	593	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	107.254	ST
	594	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	135.877	ST
	637	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	138.768	ST
	785	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	74.100	Agitação
N_3	788	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	77.292	ST
	789	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	89.300	ST
	831	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	99.104	ST
	867	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	105.374	ST
	868	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	107.254	ST
	921	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	125.552	ST
	946	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	135.877	ST
	1016	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	138.768	ST

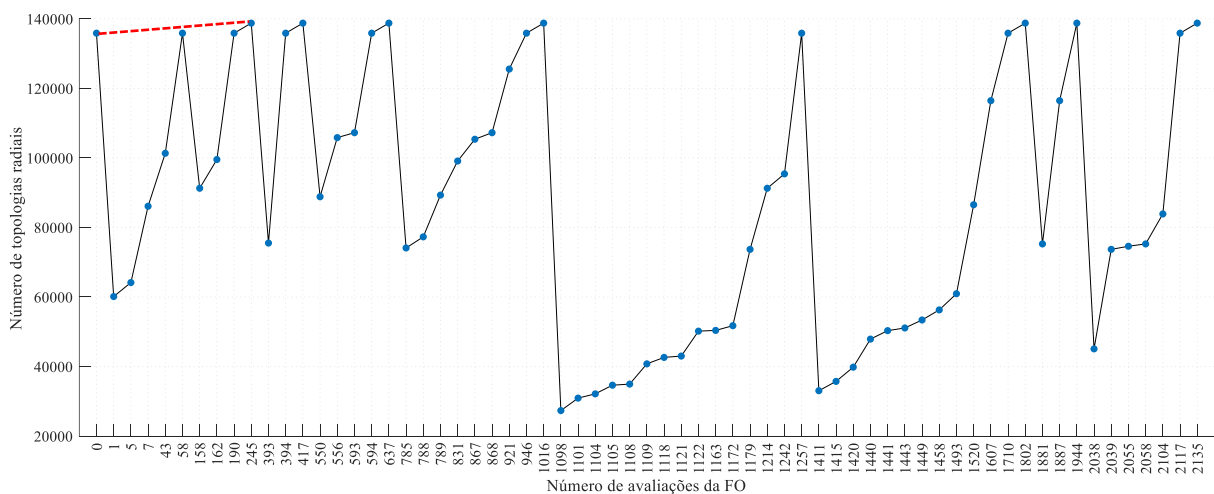
Fonte: Elaborado pela autora.

A meta-heurística VNS-BVNS apresenta dois critérios de parada: o primeiro é atingir um número máximo de nível de vizinhança, no nosso caso N_6 , enquanto o segundo é baseado

em um número máximo de iterações. Na Figura 12, os resultados são mostrados tendo como critério de parada o número máximo de iterações ($iter_{max}=10$). Durante essas 10 iterações, a solução corrente é aprimorada na avaliação 245, onde o vetor binário de solução é [1 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0 0 1 0 1 0 0 0], resultando em FO de 138.768. Observa-se que, a partir deste ponto, os valores máximos ao final de cada nível de vizinhança permanecem iguais ou até piores (avaliações 417, 637, 1016, 1257 e 1802), até alcançar N_6 , o máximo nível de vizinhança. Por essa razão, a solução encontrada na avaliação 245 não se altera até o final deste processo. É significativo observar que, na avaliação 245, ao melhorar a solução corrente, retorna-se de N_2 para N_1 . Outro aspecto notável ocorre na avaliação 1802, onde, ao não melhorar a FO desde N_1 , avança-se até o nível de vizinhança máxima N_6 para então retornar a N_1 .

Na Figura 12, verifica-se que, após a agitação dentro de um nível de vizinhança específica, o valor da FO tende a ser menor (avaliações 1, 158, 393, 550, 785, 1098, 1411, 1881 e 2038) do que o valor máximo encontrado na vizinhança anterior; a partir destas avaliações, a busca local interna persegue todos os valores que possam melhorar o resultado, conduzindo a um aumento gradual dos valores dentro de cada nível de vizinhança até alcançar um máximo. Cabe enfatizar que a agitação depende do nível de vizinhança em que se está. Por exemplo, no N_1 , a agitação consiste em remover um ramo aleatoriamente para substituir por outro também aleatório, até chegar a N_6 , onde se removem seis ramos aleatórios e se introduzem outros seis de maneira similar. Por fim, destaca-se a linha pontilhada vermelha que representa a trajetória da solução do VNS-BVNS, que progride somente de forma ascendente através de soluções melhores. O tempo de CPU consumido por esse algoritmo foi de 2,29 segundos.

Figura 12 – Resultados obtidos da meta-heurística VNS na versão BVNS



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.4 Tipo de condutor utilizado em ramos adicionais

Após identificar os 6 melhores ramos a serem adicionados à solução em construção, que foram selecionados através da aplicação da meta-heurística VNS em suas versões VND e BVNS, o próximo passo envolve a escolha do tipo de condutor a ser instalado em cada um desses ramos. A estratégia de seleção do tipo de condutor é de natureza empírica. Assim, o condutor selecionado é aquele que possui a maior capacidade e está conectado a uma das barras associadas ao ramo adicional.

As informações apresentadas na Tabela 19 mostram o tipo de condutor atribuído aos 6 melhores ramos, o comprimento em km de cada ramo adicionado, o custo por km do condutor tipo a , o custo de instalação de cada ramo, e o custo total pela adição dos 6 ramos ao sistema, totalizando 54.300 USD.

Tabela 19 – Tipo e custo de condutor atribuído a cada ramo adicionado

Número de ramo	i	j	Tipo de condutor	l_{ij} (km)	$C_{tij,a}^{ra}$ (KUSD/km)	Custo (USD)
1	25	24	1	0,218	30	6.540
2	10	31	1	0,312	30	9.360
3	43	13	1	0,375	30	11.250
4	39	38	1	0,343	30	10.290
5	16	40	1	0,250	30	7.500
6	47	42	1	0,312	30	9.360
Custo total						54.300

Fonte: Elaborado pela autora.

Após identificar os ramos selecionados e o custo correspondente à sua instalação, a Tabela 20 apresenta um resumo dos resultados obtidos tanto com o AHC quanto com o VNS em suas versões VND e BVNS. Esta tabela detalha a solução obtida por cada algoritmo utilizado, os ramos selecionados para serem adicionados à solução, o custo de instalação dos ramos adicionados, o tempo em segundos empregados para encontrar a solução e o total de topologias radiais obtidas com cada algoritmo. Além disso, pode-se observar que a solução proposta pela meta-heurística VNS, em ambas as versões, oferece uma melhoria significativa em comparação com o AHC em termos do número de topologias radiais diferentes encontradas.

Tabela 20 – Resultados obtidos

Algoritmo	Ramos escolhidos	Custo (USD)	Tempo (s)	FO (ntr)
AHC	43 – 13, 25 – 24, 42 – 41, 39 – 38, 10 – 31, 5 - 4	-	0,15	135.877
VND	25 – 24, 10 – 31, 43 – 13, 39 – 38, 16 – 40, 47 - 42	54300	1,56	138.768
BVNS	25 – 24, 10 – 31, 43 – 13, 39 – 38, 16 – 40, 47 - 42	54300	2,29	138.768

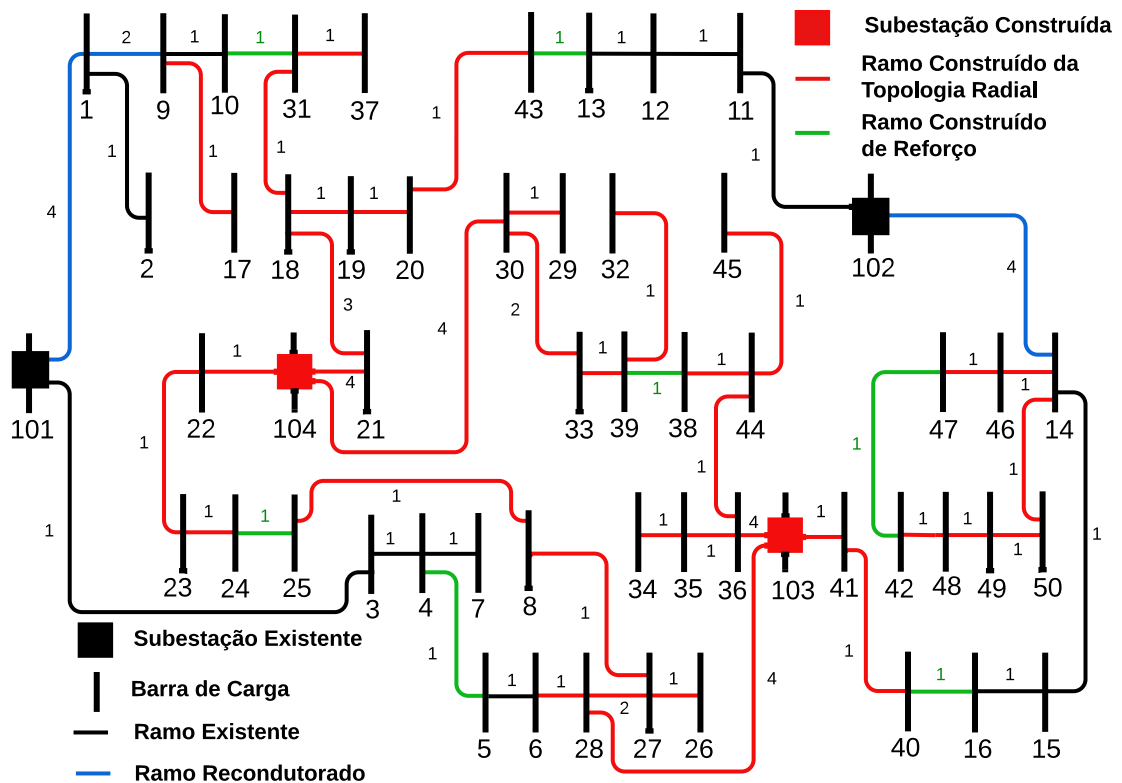
Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 13 apresenta-se o diagrama do sistema final resultante da aplicação da primeira e da segunda fase do planejamento. O sistema expandido apresenta uma estrutura ligeiramente malhada como resultado dos ramos adicionais que foram incorporados ao sistema.

Os quadrados pretos representam as subestações existentes no sistema inicial que não precisaram ser reforçadas. As linhas pretas indicam os ramos existentes no sistema inicial, enquanto as linhas azuis denotam os ramos aos quais foi aplicado o recondutoramento na primeira fase do planejamento; por outro lado, as linhas e os quadrados vermelhos representam os ramos e as subestações que foram instalados durante a primeira fase de planejamento. Finalmente, as linhas verdes mostram os ramos adicionais (ramos de reforço) incorporados ao sistema na segunda fase de planejamento.

Por fim, o ramo presente no caminho (4 – 5), que não integra a topologia radial, é incorporado como um ramo adicional sem custo, permanecendo desligado em operação normal. Assim, a topologia final contém 7 ramos adicionais.

Figura 13 – Sistema final com a adição dos ramos adicionais



Fonte: Elaborado pela autora.

No diagrama do sistema final detalha-se o tipo de condutor atribuído aos ramos aos quais foi aplicado o reconduzimento, bem como os ramos construídos na primeira fase e os ramos incorporados na segunda fase de planejamento.

Os resultados obtidos demonstram que o sistema expandido é significativamente mais confiável do que um sistema radial, devido à sua estrutura ligeiramente malhada. Essa configuração permite que, em caso de falha ou manutenção de um componente, os ramos adicionais entrem em operação, garantindo a continuidade operacional e evitando interrupções no fornecimento elétrico. O aumento no número de topologias radiais é um fator fundamental que contribui para melhorar a confiabilidade e adaptabilidade do sistema em caso de falhas ou necessidades de manutenção. Esses ramos adicionais fornecem ao sistema uma maior flexibilidade, permitindo lidar com falhas e manutenções sem interromper o serviço. A inclusão desses ramos adicionais não apenas otimiza o desempenho do sistema elétrico ao assegurar uma operação mais eficiente e robusta, mas também aumenta a capacidade do sistema de lidar com situações de contingência de forma eficaz.

Os resultados desta segunda etapa complementam os resultados alcançados na primeira fase do planejamento. Nesta segunda fase, a estratégia do planejador do sistema de distribuição visou aproveitar os 19 ramos não construídos na fase anterior, optando por escolher os 6 melhores ramos que contribuíssem para aumentar a confiabilidade, através da maximização das topologias radiais alternativas às já existentes, com o intuito de reforçar a confiabilidade perante falhas inesperadas ou manutenções programadas na rede.

Foi implementado um AHC com a finalidade de encontrar uma solução de boa qualidade, embora não necessariamente ótima. Ao término da execução deste AHC, foi identificado como solução o vetor binário [1 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0], que especifica as posições dos 6 ramos selecionados dentre 19 possíveis, os quais, ao serem avaliados na FO, geram 135.877 topologias radiais alternativas. Para aprimorar esta solução obtida através do AHC, foi introduzida a meta-heurística VNS em suas versões VND e BVNS; o VND superou o resultado alcançado pelo AHC, embora com uma robustez limitada, enquanto o BVNS também evoluiu até atingir o mesmo valor do VND, obtendo muitas soluções de igual qualidade àquela encontrada pelo VND, graças à sua capacidade de incorporar agitação aleatória e realizar buscas locais internas que facilitam a exploração de diversas áreas do espaço de busca. Tanto o VND quanto o BVNS identificaram como solução o vetor binário [0 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0 0 1 0 1 0 0 0], cuja FO é 138.768. Foi evidenciado que o AHC efetivamente encontra uma solução de elevada qualidade, embora não necessariamente a melhor, e que tanto o VND quanto o BVNS, tomando como base a solução encontrada pelo AHC, iniciam a busca pela melhor combinação de 6 ramos que leve à melhoria da solução, seguindo apenas combinações de ramos que melhorem a FO. Além disso, os tempos de CPU consumidos foram de 0,15 segundos para o AHC, 1,56 segundos para o VND e 2,29 segundos para o BVNS. Por outro lado, a seleção dos tipos de condutores para estes 6 ramos adicionais, os quais contribuem para aumentar a confiabilidade do sistema, foi determinada empiricamente. Optou-se por escolher o tipo de condutor do ramo com maior capacidade entre os dois que chegam às barras extremas de cada um dos 6 ramos identificados na solução do VNS.

5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A implementação de uma estratégia de expansão em um sistema de distribuição, dividida em duas etapas, resulta em uma melhoria significativa da confiabilidade do sistema ao otimizar a configuração radial e adicionar ramos adicionais. Essa abordagem permite uma maior continuidade operacional em caso de falhas ou manutenções.

O planejamento de expansão utilizando o método PCSOBM foi executada com sucesso, resultando na determinação de uma configuração radial ótima para o sistema em análise. O custo total de planejamento foi de USD 4.788.328, incluindo tanto os custos de construção de subestações quanto os de construção e recondutoramento de ramos. O processo demonstrou eficiência, resolvendo o problema em 34,22 segundos, comprovando a viabilidade do método em termos de custo e tempo.

A confiabilidade do sistema de distribuição foi aprimorada pela inclusão de 6 ramos adicionais, formando um grafo que gera o maior número de topologias radiais alternativas, para aumentar a continuidade operacional. Os resultados obtidos destacam a eficácia das técnicas de otimização empregadas, especialmente a meta-heurística VNS, alcançando 138.768 topologias radiais alternativas, em comparação com as 135.877 topologias encontradas pelo AHC, o que representa uma melhoria considerável.

Por fim, os resultados obtidos, incluindo a adição dos 6 ramos, fortaleceram significativamente a confiabilidade do sistema de expansão como um todo, garantindo maior robustez e eficiência operacional.

Trabalhos futuros podem ser desenvolvidos a partir deste estudo. Assim, podem ser abordados os seguintes tópicos:

1. Desenvolver um modelo matemático determinístico que resolva e compare a segunda etapa implementada neste estudo por meio de meta-heurísticas.
2. Abordar o problema de PESD de maneira conjunta, unificando as Etapas 1 e 2. Esta solução integrada pode ser resolvida através do uso de meta-heurísticas ou pela formulação de um modelo matemático, que posteriormente seria resolvido usando um *solver* de otimização.

3. Realizar uma análise mais detalhada sobre como avaliar a confiabilidade de um sistema de distribuição, comparando a estratégia apresentada neste trabalho com outras propostas da expansão de sistemas de distribuição e considerando todas as formas de avaliar a confiabilidade do sistema.
4. Generalizar a proposta apresentada para formas mais complexas de PESD considerando o planejamento multiestágio, o planejamento considerando geradores distribuídos controláveis e não controláveis, e considerar também as características estocásticas do sistema, entre outras.

REFERÊNCIAS

- AGUSTÍN, J. L. **Aplicación de algoritmos genéticos al diseño óptimo de sistemas de distribución de energía eléctrica**. Universidad de Zaragoza. Zaragoza. 1998.
- ALMEIDA, M.; ROCHA, C. R. M.; FREITAS, R. L. B. Constructive Heuristic Algorithm in Multi-Start Structure Applied in Distribution Systems Expansion Planning. **IEEE URUCON 2021**, Montevideo, p. 16-20, nov 2021.
- AULT, G. W.; FOOTE, C. E. T.; MCDONALD, J. R. Distribution system planning in focus. **IEEE Power Engineering Review**, Piscataway, v. 22, n. 1, p. 60–62, jan 2002.
- BOSISIO, A.; BERIZZI, A. et al. A GIS-based approach for high-level distribution networks expansion planning in normal and contingency operation considering reliability. **Electric Power Systems Research**, Milán, v. 190, p. 106684, jan 2021.
- CAMARGO, V.; LAVORATO, M.; ROMERO, R. Specialized genetic algorithm to solve the electrical distribution system expansion planning. **IEEE Power & Energy Society General Meeting 2013**, Vancouver, p. 1-5, Jul 2013.
- CIVANLAR, S.; GRAINGER, J. et al. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 3, n. 3, p. 1217 -1223, jul 1988.
- COSSI, A. M.; SILVA, L. G. W. et al. Primary power distribution systems planning taking into account reliability, operation and expansion costs. **IET Generation, Transmission & Distribution**, Stevenage, v. 6, n. 3, p. 274-284, mar 2012.
- FRANCO, J. F.; RIDER, M. J. et al. A mixed-integer LP model for the reconfiguration of radial electric distribution systems considering distributed generation. **Electric Power Systems Research**, Amsterdã, v. 97, p. 51-60, apr 2013.
- FRANCO, J. F.; RIDER, M. J. et al. Optimal conductor size selection and reconductoring in radial distribution systems using a mixed-integer LP approach. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 28, n. 1, p. 10-20, feb 2013.
- FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; ROMERO, R. A mixed-integer quadratically-constrained programming model for the distribution system expansion planning. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Londres, v. 62, p. 265-272, nov 2014.
- GANGULY, S.; SAHOO, N. C.; DAS, D. Recent advances on power distribution system planning: a state-of-the-art survey. **Energy Systems**, Heidelberg, v. 4, n. 2, p. 165-193, jan 2013.

- GOMEZ RAMIREZ, G. A. Evolución y tendencias de índices de confiabilidad en sistemas eléctricos de potencia. **Revista Tecnología en Marcha**, Costa Rica, v. 29, n. 2, p. 3-13, aug 2016.
- GOMEZ, J. F.; KHODR, H. M. et al. Ant colony system algorithm for the planning of primary distribution circuits. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 19, n. 2, p. 996-1004, may 2004.
- GÖNEN, T.; RAMIREZ-ROSADO, I. J. Review of distribution system planning models: A model for optimal multistage planning. **IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution)**, Stevenage, v. 133, n. 7, p. 397-408, nov 1986.
- GOSWAMI, S. K. Distribution system planning using branch exchange technique. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 12, n. 2, p. 718-723, may 1997.
- HARRIS, J. M.; HIRST, J. L.; MOSSINGHOFF, M. J. **Combinatorics and Graph Theory**. New York: Springer, v. 51, 2008.
- HINCAPIÉ ISAZA, R. A.; GRANADA ECHEVERRI, M.; GALLEGO RENDÓN, R. A. Planeamiento de subestaciones y alimentadores en sistemas de distribución usando programación entera. **Scientia et Technica**, Pereira, v. 11, n. 27, p. 7-12, abr 2005.
- JABR, R. A. Polyhedral formulations and loop elimination constraints for distribution. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 28, n. 2, p. 1888–1897, may 2013.
- JABR, R. A.; SINGH, R.; PAL, B. C. Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 27, n. 2, p. 1106-1115, may 2012.
- JOOSHAKI, M.; ABBASPOUR, A. et al. Linear formulations for topology-variable-based distribution system reliability assessment considering switching interruptions. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Piscataway, v. 11, n. 5, p. 4032-4043, sep 2021.
- JOOSHAKI, M.; ABBASPOUR, A. et al. An enhanced MILP model for multistage reliability-constrained distribution network expansion planning. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 37, n. 1, p. 118-131, jan 2022.
- KAEWMAMUANG, K.; SIRITARATIWAT, A. et al. A novel method for solving multi-stage distribution substation expansion planning. **Energy Procedia**, v. 156, p. 371-383, jan 2019.
- LAVORATO, M. **Planejamento Integrado da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. Tese (doutorado)- Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Campinas. 2010.

- LAVORATO, M.; FRANCO, F. et al. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 27, n. 1, p. 172-180, feb 2012.
- LAVORATO, M.; RIDER, M. J. et al. Distribution network planning using a constructive heuristic algorithm. **IEEE Power & Energy Society General Meeting 2009**, Calgary, p. 1-6, Jul 2009.
- LAVORATO, M.; RIDER, M. J. et al. A constructive heuristic algorithm for distribution system planning. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 25, n. 3, p. 1734-1742, aug 2010.
- LI, Z.; WU, W. et al. A reliability-constrained expansion planning model for mesh distribution networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 36, n. 2, p. 948-960, mar 2021.
- LIN, Z.; HU, Z.; SONG, Y. Distribution network expansion planning considering N-1 criterion. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 34, n. 3, p. 2476-2478, may 2019.
- LOTERO, R. C.; CONTRERAS, J. Distribution system planning with reliability. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 26, n. 4, p. 2552-2562, oct 2011.
- MACEDO, L. H.; FRANCO, J. F. et al. A contribution to the optimization of the reconfiguration problem in radial distribution systems. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, Heidelberg, v. 29, n. 6, p. 756-768, sep 2018.
- MACEDO, L. H.; ORTEGA-VAZQUEZ, M. A.; ROMERO, R. Optimal distribution systems expansion planning for improving service restoration. **IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition-Latin America (T&D-LA) 2018**, Lima, p. 1-5, sep 2018.
- MACEDO, L. H.; ROMERO, R. Algoritmo Heurístico Construtivo para o Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição. **VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, Natal, may 2016.
- MENDOZA, F. **Diseño multiobjetivo y multietapa de sistemas de distribución de energía**. Tesis (Doctoral) – Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Zaragoza. Zaragoza, p. 224f. 2010.
- MIRANDA, V.; RANITO, J. V.; PROENCA, L. M. Genetic algorithms in optimal multistage distribution network planning. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 9, n. 4, p. 1927-1933, 1994.

- MUNOZ-DELGADO, G.; CONTRERAS, J.; ARROYO, J. M. Distribution Network Expansion Planning With an Explicit Formulation for Reliability Assessment. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 33, n. 3, p. 2583-2596, may 2018.
- MUÑOZ-DELGADO, G.; CONTRERAS, ; ARROYO, J. M. Reliability assessment for distribution optimization models: A non-simulation-based linear programming approach. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Piscataway, v. 9, n. 4, p. 3048-3059, jul 2018.
- NARA, K.; SATOH, T. et al. Distribution systems expansion planning by multi-stage branch exchange. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 7, n. 1, p. 208-214, 1992.
- PEREIRA JUNIOR, B. R.; COSSI, A. M. et al. Multiobjective multistage distribution system planning using tabu search. **IET Generation, Transmission & Distribution**, Stevenage, v. 8, n. 1, p. 35-45, jan 2014.
- PONNAVAIKKO, N.; RAO, K. S. P.; VENKATA, S. S. Distribution system planning through a quadratic mixed integer programming approach. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 2, n. 4, p. 1157-1163, 1987.
- POSSAGNOLO, L. H. F. M. **Planejamento da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica considerando restauração do fornecimento**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)-Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira. 2019.
- POZOS, A. T.; OLIVEIRA, M. L. et al. A mixed-binary linear formulation for the distribution system expansion planning problem. **IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition-Latin America (PES T&D-LA) 2014**, Medellín, p. 1-6, sep 2014.
- RAMIREZ-ROSADO, I. J.; BERNAL-AGUSTIN, L. Genetic algorithms applied to the design of large power distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 13, n. 2, p. 696 -703, may 1998.
- RAMÍREZ-ROSADO, I. J.; DOMÍNGUEZ-NAVARRO, J. A. New multiobjective tabu search algorithm for fuzzy optimal planning of power distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 21, n. 1, p. 224-233, feb 2006.
- RASTGOU, A.; HOSSEINI-HEMATI, S. Simultaneous planning of the medium and low voltage distribution networks under uncertainty: a Bi-level optimization approach. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, v. 2022, p. 1–19, sep 2022.
- RUPOLO, D.; PEREIRA JR, B. R. et al. Medium-and low-voltage planning of radial electric power distribution systems considering reliability. **IET Generation, Transmission & Distribution**, Stevenage, v. 11, n. 9, p. 2212-2221, jun 2017.

- RUPOLO, D.; PEREIRA JUNIOR, B. R. et al. A new parallel and decomposition approach to solve the medium-and low-voltage planning of large-scale power distribution systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Londres, v. 132, p. 107191, nov 2021.
- SAHOO, N. C.; GANGULY, S.; DAS, D. Multi-objective planning of electrical distribution systems incorporating sectionalizing switches and tie-lines using particle swarm optimization. **Swarm and Evolutionary Computation**, Amsterdã, v. 3, p. 15-32, apr 2012.
- SOUSA, R. F.; LAVORATO, M. et al. Metaheurística vns para o problema de planejamento da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica. **XLII Simpósio de Pesquisa Operacional**, Ubatuba, p. 1630-1641, 2011.
- SOUZA, R. F. F. **Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição Usando a Metaheurística de Busca em Vizinhança Variável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Ilha Solteira. 2011.
- TABARES POZOS, A. **Planejamento dinâmico a longo prazo de ativos de sistemas de distribuição de energia elétrica considerando a incorporação de diferentes tipos de elementos adicionais de expansão**. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica)-Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira. 2015.
- TABARES, A.; FRANCO, J. F. et al. Multistage long-term expansion planning of electrical distribution systems considering multiple alternatives. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 31, n. 3, p. 1900-1914, may 2016.
- TABARES, A.; MUÑOZ-DELGADO, G. et al. Multistage reliability-based expansion planning of AC distribution networks using a mixed-integer linear programming model. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Londres, v. 138, p. 107916, jun 2022.
- WILLIS, H. L. **Power distribution planning reference book**. 2da. ed. New York: Marcel Dekker, 2004.

APÊNDICE A – DADOS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO TESTADO

A1 – Sistema de distribuição de 54 barras

Tabela 21 – Dados do sistema de 54 barras

Ramo	P^D kW	Q^D kVAr	Ramo	P^D kW	Q^D kVAr
101	0,00	0,00	24	431,25	239,58
102	0,00	0,00	25	776,25	431,25
103	0,00	0,00	26	1035,00	575,00
104	0,00	0,00	27	1293,75	718,75
1	3622,50	2012,50	28	603,75	335,42
2	1293,75	718,75	29	1207,50	670,83
3	603,75	335,42	30	2242,50	1245,83
4	948,75	527,08	31	603,75	335,42
5	2242,50	1245,83	32	1466,25	814,58
6	603,75	335,42	33	2501,25	1389,58
7	862,50	479,17	34	1035,00	575,00
8	1638,75	910,42	35	776,25	431,25
9	1035,00	575,00	36	258,75	143,75
10	2501,25	1389,58	37	1811,25	1006,25
11	258,75	143,75	38	948,75	527,08
12	1552,50	862,50	39	862,50	479,17
13	948,75	527,08	40	1207,50	670,83
14	862,50	479,17	41	776,25	431,25
15	1207,50	670,83	42	1035,00	575,00
16	1638,75	910,42	43	1121,25	622,92
17	603,75	335,42	44	1207,50	670,83
18	1035,00	575,00	45	690,00	383,33
19	1207,50	670,83	46	1552,50	862,50
20	690,00	383,33	47	862,50	479,17
21	1552,50	862,50	48	690,00	383,33
22	948,75	527,08	49	431,25	239,58
23	862,50	479,17	50	690,00	383,33

Fonte: Adaptado de Lavorato (2010)

Tabela 22 – Dados de ramos do sistema de 54 barras

<i>i</i>	<i>j</i>	Comprimento km	<i>i</i>	<i>j</i>	Comprimento km	<i>i</i>	<i>j</i>	Comprimento km
1	101	0,281	22	9	0,468	34	33	0,187
3	101	0,218	23	22	0,343	35	34	0,218
4	3	0,312	24	23	0,281	36	35	0,218
7	4	0,250	25	24	0,218	36	103	0,250
5	4	0,312	8	25	0,281	28	103	0,312
8	7	0,312	27	8	0,375	41	103	0,312
6	5	0,250	26	27	0,343	40	41	0,375
9	1	0,343	28	27	0,312	16	40	0,250
2	1	0,312	28	6	0,500	42	41	0,375
10	9	0,718	30	104	0,281	48	42	0,250
14	102	0,375	29	30	0,312	49	48	0,375
15	14	0,375	43	30	0,406	50	49	0,218
16	15	0,281	37	43	0,250	47	42	0,312
11	102	0,281	31	37	0,187	46	47	0,312
12	11	0,312	10	31	0,312	14	46	0,343
13	12	0,437	43	13	0,375	18	31	0,218
20	19	0,312	45	12	0,250	20	43	0,312
19	18	0,250	44	45	0,218	2	22	0,187
18	17	0,406	38	44	0,312	30	33	0,250
17	9	0,430	39	38	0,343	21	33	0,718
21	18	0,312	32	39	0,406	36	44	0,281
21	104	0,250	33	39	0,281	25	3	0,406
22	104	0,375	8	33	0,468	50	14	0,187

Fonte: (Lavorato, 2010)