

IZABELI MONEDA ROSA DE OLIVEIRA

**ALGORITMO EM ESTRUTURA *BRANCH AND BOUND*
APLICADO AO PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO DE
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Câmpus de Ilha Solteira - SP

IZABELI MONEDA ROSA DE OLIVEIRA

**ALGORITMO EM ESTRUTURA *BRANCH AND BOUND*
APLICADO AO PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO DE
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista - UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Automação

Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro
Orientador

Ilha Solteira - SP
2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

O48a Oliveira, Izabeli Moneda Rosa de.
Algoritmo em estrutura branch and bound aplicado ao problema da reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica / Izabeli Moneda Rosa de Oliveira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021
97 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2021

Orientador: Rubén Augusto Romero Lázaro
Inclui bibliografia

1. Reconfiguração de sistemas de distribuição. 2. Branch and bound. 3. Redução de perdas.


Raiane da Silva Santos



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Algoritmo em estrutura branch and bound aplicado ao problema da reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica

AUTORA: IZABELI MONEDA ROSA DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO

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 Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

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

Prof.ª. Dr.ª. CARMEN LÚCIA TANCREDO BORGES (Participação Virtual)
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Ilha Solteira, 08 de abril de 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe Grasieli e à minha avó Cecília, por todo amor, apoio e incentivo em todos os momentos de minha vida.

Aos meus irmãos e melhores amigos, Camila e Luann, por todo amor, força e por estarem sempre ao meu lado.

Ao meu namorado Marcelo, por todo amor, paciência e por me apoiar e encorajar em todas as minhas decisões.

Ao meu amigo Eduardo, que sempre se faz presente em minha vida, me ouvindo, aconselhando e dando força quando preciso.

Às minhas amigas, Andréia, Andressa, Camilla, Enielma e Roberta pelo companheirismo durante esta jornada.

Ao Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro pela orientação, dedicação e colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Gabriel Puerta pelo apoio, ajuda e contribuição direta na realização deste trabalho.

Aos professores e colegas do Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica (LaPSEE) que colaboraram de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) - processo nº 2015/21972-6, pelo apoio financeiro.

"N3o esqueça o motivo de nenhuma de suas partidas."

Ryane Le3o

RESUMO

O problema de reconfiguração de sistemas de energia elétrica consiste em modificar a topologia da rede para obter uma nova configuração radial, de forma que um objetivo seja atingido, geralmente a minimização de perdas. Este trabalho apresenta um algoritmo em estrutura *branch and bound* para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica, que é modelado como um problema de Programação Não Linear Inteiro Misto (PNLIM). O algoritmo é uma versão melhorada do algoritmo em estrutura *branch and bound* originalmente apresentado por Merlin & Back em 1975. Assim, é sugerida: a utilização da proposta de Glover & Zionts para realizar o controle da árvore de *branch and bound*, o algoritmo de Prim para acelerar o processo de busca, uma proposta relacionada com testes de sondagem mais eficientes e o uso de algoritmos de fluxo de carga para redes radiais e fracamente malhadas mais eficaz. O objetivo é minimizar as perdas de potência ativa nos alimentadores. O algoritmo em estrutura *branch and bound* foi implementado em ambiente MATLAB[®]. Para evidenciar a eficácia da metodologia proposta foram realizados testes em quatro sistemas conhecidos na literatura de 33, 69, 84 e 136 barras. A partir dos resultados obtidos, verifica-se o bom desempenho do algoritmo para encontrar as melhores soluções disponíveis na literatura.

Palavras-chave: Reconfiguração de sistemas de distribuição. *Branch and Bound*. Redução de perdas.

ABSTRACT

O problema de reconfiguração de sistemas de energia elétrica consiste em modificar a topologia da rede para obter uma nova configuração radial, de forma que um objetivo seja atingido, geralmente a minimização de perdas. The distribution network reconfiguration problem consists of modifying the network topology to obtain a new radial configuration, so that an objective is achieved, usually loss minimization. This work presents an algorithm using a branch and bound structure to solve the distribution network reconfiguration problem, which is modeled as a Mixed Integer Nonlinear Programming problem (MINLP). The algorithm is an improved version of the branch and bound algorithm originally presented by Merlin & Back in 1975. Thus, it is suggested: the to use the Glover & Ziont's proposal to carry out the control of the branch and bound tree, the Prim algorithm to accelerate the search process, a proposal related to more efficient sounding tests and the use of more efficient load flow algorithms for radial and weakly meshed networks. The objective is to minimize the active power loss in the feeders. The algorithm using a branch and bound structure is implemented in MATLAB[®]. To demonstrate the effectiveness of the proposed methodology, tests were carried out in four systems known in the literature of 33, 69, 84 and 136 buses. Based on two results obtained, the algorithm is checked or performed to find the best solutions available in the literature.

Keywords: Distribution systems reconfiguration. Branch and Bound. Loss reduction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Sistema de 14 barras.	21
Figura 2	Passo a passo do AHC para o sistema de 14 barras.	22
Figura 3	Evolução do AHC para o sistema de 14 barras.	23
Figura 4	Execução do algoritmo de Prim em um grafo.	30
Figura 5	Sistema de 14 barras com identificação de laços.	35
Figura 6	Primeira iteração no primeiro laço.	35
Figura 7	Segunda iteração no primeiro laço.	36
Figura 8	Árvore exemplo.	38
Figura 9	Fluxograma.	44
Figura 10	Árvore de <i>branch and bound</i> da solução inicial para o sistema de 14 barras.	45
Figura 11	Árvore de <i>branch and bound</i> para o sistema de 14 barras - Primeira parte.	46
Figura 12	Árvore de <i>branch and bound</i> para o sistema de 14 barras - Segunda parte.	47
Figura 13	Árvore de <i>branch and bound</i> para o sistema de 14 barras - Terceira parte.	48
Figura 14	Perfis de tensão no sistema de 14 barras antes e depois da reconfiguração.	49
Figura 15	Árvore de <i>branch and bound</i> com Prim para o sistema de 14 barras - Primeira parte.	50
Figura 16	Árvore de <i>branch and bound</i> com Prim para o sistema de 14 barras - Segunda parte.	50
Figura 17	Árvore de <i>branch and bound</i> com Prim para o sistema de 14 barras - Terceira parte.	51
Figura 18	Sistema de 33 barras.	52
Figura 19	Perfis de tensão no sistema de 33 barras antes e depois da reconfiguração.	54
Figura 20	Sistema de 69 barras.	55

Figura 21	Perfis de tensão no sistema de 69 barras antes e depois da reconfiguração.	56
Figura 22	Sistema de 84 barras.	57
Figura 23	Perfis de tensão no sistema de 84 barras antes e depois da reconfiguração.	59
Figura 24	Sistema de 136 barras.	60
Figura 25	Perfis de tensão no sistema de 136 barras antes e depois da reconfiguração.	62
Figura 26	Sistema de distribuição radial.	80
Figura 27	Sistema de distribuição radial com ramos ordenados em camadas. . . .	81
Figura 28	Trecho de um sistema de distribuição radial.	82
Figura 29	Algoritmo de fluxo de carga de varredura para sistemas radiais.	85
Figura 30	Sistema de distribuição fracamente malhado.	86
Figura 31	Circuito equivalente de Thévenin da rede vista pelos <i>breakpoints</i>	87
Figura 32	Algoritmo de fluxo de carga de varredura para sistemas fracamente malhadas.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Posição dos ramos livres em cada iteração para o sistema de 14 barras.	23
Tabela 2	Resultados do AHC para o sistema de 14 barras.	23
Tabela 3	Índices para o algoritmo de Prim com o sistema de 14 barras.	32
Tabela 4	Resultados para o sistema de 14 barras.	49
Tabela 5	Resultados para o sistema de 14 barras.	51
Tabela 6	Resultados para o sistema de 33 barras.	53
Tabela 7	Resultados para o sistema de 69 barras.	55
Tabela 8	Resultados para o sistema de 84 barras.	58
Tabela 9	Resultados para o sistema de 136 barras.	61
Tabela 10	Comparação de resultados quanto às perdas.	62
Tabela 11	Dados do sistema de 14 barras.	68
Tabela 12	Dados do sistema de 33 barras.	69
Tabela 13	Dados do sistema de 69 barras.	70
Tabela 14	Dados do sistema de 84 barras.	73
Tabela 15	Dados do sistema de 136 barras.	76

LISTA DE ABREVIATURAS

AHC	Algoritmo Heurístico Construtivo
BVNS	Basic Variable Neighborhood Search
FCFM	Fluxo de Carga para sistemas Fracamente Malhados
FCR	Fluxo de Carga para sistemas Radiais
GRASP	Greedy Randomize Adaptative Search Procedure
GVN	General Variable Neighborhood Search
LIFO	Last In, First Out
PCSOIM	Modelo Cônico de Segunda Ordem Inteiro Misto
PLIM	Programação Linear Inteiro Misto
PNLIM	Programação Não Linear Inteiro Misto
PQIM	Programação Quadrática Inteira Mista
RSDEE	Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica
RVNS	Reduced Variable Neighborhood Search
VND	Variable Neighborhood Descent
VNS	Variable Neighborhood Search

LISTA DE SÍMBOLOS

g_{ij}	Condutância do ramo ij
Ω_{b_i}	Conjunto de barras conectadas à barra i
Ω_b	Conjunto de barras do sistema
C	Conjunto de nós ativos que ainda não foram sondados da árvore de <i>branch and bound</i>
X'	Conjunto de nós da árvore de <i>branch and bound</i>
Ω_l	Conjunto de ramos do sistema
D	Conjunto de subgrafos do grafo completo
P_i^D	Demanda ativa na barra i
Q_i^D	Demanda reativa na barra i
θ_{ij}	Diferença angular entre as tensões das barras i e j
x_{ij}	Estado de operação da chave do ramo ij
H	Estrutura em árvore <i>branch and bound</i>
\hat{I}_i	Fasor corrente absorvida pela carga na barra i
\hat{I}_{ij}	Fasor corrente no ramo ij
\bar{I}_{ij}	Fluxo máximo de corrente permitido no ramo ij
G	Grafo completo do sistema de distribuição
\bar{Z}_{ij}	Impedância complexa da linha i e a coluna j da matriz das impedâncias equivalentes de Thévenin vistas pelos <i>breakpoints</i>
\underline{V}	Limite dos módulos de tensão inferiores nas barras
\bar{V}	Limite dos módulos de tensão superiores nas barras
Z_{th}	Matriz de impedâncias equivalentes de Thévenin vistas pelo <i>breakpoints</i>
v	Minimização de perdas ativas do sistema de distribuição de energia elétrica - Função Objetivo
V_i	Módulo da tensão na barra i
I_{ij}	Módulo do fasor corrente no ramo ij
x'	Nó do conjunto de nós da árvore de <i>branch and bound</i>
nr	Número de ramos do sistema de distribuição
nb	Número de barras do sistema de distribuição
T	Operação dos nós da árvore de <i>branch and bound</i>
Γ	Operação que identifica nós sucessores na árvore de <i>branch and bound</i>
S	Operação que identifica uma topologia radial

Z_{th}^m	Parte imaginária da matriz das impedâncias equivalentes de Thévenin vistas pelos <i>breakpoints</i>
$I_{m_{ij}}$	Parte imaginária do fasor corrente no ramo ij
V_{m_i}	Parte imaginária do fasor tensão na barra i
$I_{m_{ij}}$	Parte imaginária do fluxo de corrente no ramo ij
I_m	Parte imaginária do vetor de correntes injetadas nos <i>breakpoints</i>
ΔI_m	Parte imaginária do vetor de variação de correntes nos <i>breakpoints</i>
ΔV_m	Parte imaginária do vetor de variação de queda de tensão nos <i>breakpoints</i>
Z_{th}^r	Parte real da matriz das impedâncias equivalentes de Thévenin vistas pelos <i>breakpoints</i>
$I_{r_{ij}}$	Parte real do fasor corrente no ramo ij
V_{r_i}	Parte real do fasor tensão na barra i
$I_{r_{ij}}$	Parte real do fluxo de corrente no ramo ij
I_r	Parte real do vetor de correntes injetadas nos <i>breakpoints</i>
ΔI_r	Parte real do vetor de variação de correntes nos <i>breakpoints</i>
ΔV_r	Parte real do vetor de variação de queda de tensão nos <i>breakpoints</i>
$P_{a_{ij}}$	Perdas ativas no ramo ij
P_a	Perdas ativas totais no sistema
$Q_{r_{ij}}$	Perdas reativas no ramo ij
Q_r	Perdas reativas totais no sistema
S_i^D	Potência complexa demandada na barra i
P_i^D	Potência ativa demandada na barra i
P_{ij}	Potência ativa do ramo ij
P_i^S	Potência ativa fornecida pela subestação na barra i
Q_i^D	Potência reativa demandada na barra i
Q_{ij}	Potência reativa do ramo ij
Q_i^S	Potência reativa fornecida pela subestação na barra i
X_{ij}	Reatância do ramo ij
R_{ij}	Resistência do ramo ij
J_t	Solução corrente parcial
E	Subconjunto de grafos que possuem estrutura de árvore geradora
t	Subproblema
b_{ij}	Susceptância do condutor entre as barras i e j
ε	Tolerância
x_j	Variável binária que representa status do ramo j

$ \Delta P_a $	Varição de perdas ativas entre duas iterações consecutivas do FC
ΔI	Vetor com a variação das correntes nos <i>breakpoints</i>
I	Vetor com as correntes injetadas nos <i>breakpoints</i>
ΔV	Vetor com as quedas de tensão nos <i>breakpoints</i>
V	Vetor de tensões de circuito aberto nos <i>breakpoints</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	O PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	12
1.1.1	Modelo matemático do problema de RSDEE	13
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
1.2.1	Métodos heurísticos	14
1.2.2	Meta-heurísticas	16
1.2.3	Otimização Clássica	18
2	REVISÃO DO TRABALHO DE MERLIN & BACK	20
2.1	A HEURÍSTICA CONSTRUTIVA	20
2.1.1	Algoritmo Heurístico Construtivo	20
2.1.2	Exemplo ilustrativo	21
2.2	O ALGORITMO EM ESTRUTURA BRANCH AND BOUND	24
2.2.1	Premissas assumidas por Merlin & Back	24
2.2.1.1	<i>Definições</i>	24
2.2.1.2	<i>Processo de busca para encontrar uma solução ótima</i>	26
2.2.2	Análise crítica da proposta de Merlin & Back	27
3	ALGORITMO DE PRIM	29
3.1	TEORIA DE PRIM	29
3.2	ALGORITMO DE PRIM PARA O PROBLEMA DE RSDEE	31
3.3	EXEMPLO ILUSTRATIVO	32
4	ALGORITMO EM ESTRUTURA <i>BRANCH AND BOUND</i>	33
4.1	GERAÇÃO DE UMA SOLUÇÃO INICIAL DE BOA QUALIDADE	33

4.1.1	Melhoria local	33
4.2	CONTROLE DA ÁRVORE DE <i>BRANCH AND BOUND</i> UTILIZANDO A PROPOSTA DE GLOVER & ZIONTS	36
4.2.1	Conceitos e definições	37
4.2.2	Exemplo ilustrativo	38
4.3	TESTES DE SONDAÇÃO	39
4.4	ESCOLHA DO PRÓXIMO SUBPROBLEMA A SER RESOLVIDO	40
4.5	ESCOLHA DA VARIÁVEL PARA SEPARAÇÃO	41
4.6	DETERMINAÇÃO DE LIMITANTE INFERIOR E SUPERIOR DE CADA SUBPROBLEMA	41
4.7	ALGORITMO	41
4.8	ESTRATÉGIA HEURÍSTICA PARA REDUZIR O ESPAÇO DE BUSCA - ALGORITMO DE PRIM	43
4.9	FLUXOGRAMA	43
4.10	EXEMPLO ILUSTRATIVO	44
4.10.1	<i>Branch and Bound</i> básico	45
4.10.2	<i>Branch and Bound</i> utilizando Prim para acelerar o processo	49
5	TESTES E RESULTADOS	52
5.1	SISTEMA DE 33 BARRAS	52
5.2	SISTEMA DE 69 BARRAS	54
5.3	SISTEMA DE 84 BARRAS	56
5.4	SISTEMA DE 136 BARRAS	59
5.5	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	62
6	CONCLUSÕES	64
	REFERÊNCIAS	65
	ANEXO A - DADOS DOS SISTEMAS TESTADOS	68

A.1	SISTEMA DE 14 BARRAS	68
A.2	SISTEMA DE 33 BARRAS	69
A.3	SISTEMA DE 69 BARRAS	70
A.4	SISTEMA DE 84 BARRAS	72
A.5	SISTEMA DE 136 BARRAS	75

ANEXO B - ALGORITMO DE FLUXO DE CARGA PARA SISTEMAS RADIAIS E FRACAMENTE MALHADOS		80
B.1	O problema de fluxo de carga para sistemas radiais	80
B.2	O problema de fluxo de carga para sistemas fracamente malhados	85

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência podem ser subdivididos em três grandes áreas: a produção, transmissão e a distribuição de energia elétrica. Atualmente estes três segmentos são objeto de pesquisas e investimentos que visam melhorar seu desempenho, em especial o setor de distribuição de energia elétrica (SOUZA, 2013).

Ocasionado pelo processo de crescimento econômico do país, o consumo de energia elétrica vem apresentando um ritmo progressivo, resultando em um aumento na demanda de energia. Devido ao aumento da demanda aliada com a necessidade de garantir um fornecimento de energia de qualidade aos consumidores, se faz necessário o desenvolvimento de estratégias para que o sistema de distribuição de energia elétrica opere de modo econômico e confiável. Desse modo, para aumentar sua eficiência e diminuir os custos operacionais, uma alternativa é reduzir as perdas ativas no sistema. Neste sentido, a reconfiguração de sistemas de distribuição torna-se uma importante ferramenta, visto que segundo Merlin e Back (1975), dentre as opções que cabem às concessionárias para reduzir as perdas de energia da rede, a modificação da configuração dos sistemas é uma delas.

O problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica (RSDEE) pode ser visto como um problema de planejamento da operação. O problema de RSDEE consiste em encontrar uma topologia da rede de distribuição, de forma que seja otimizado um objetivo, tipicamente a redução de perdas, sujeito as restrições topológicas e operacionais do sistema. Ao realizar a RSDEE para a minimização de perdas, os seguintes benefícios podem ser obtidos (POSSAGNOLO, 2015):

- Alívio no sistema de distribuição. O sistema é aliviado quando há redução de perdas, ocasionando maior vida útil aos equipamentos, maior capacidade de fornecimento e um melhor perfil de tensão no sistema;
- Adiamiento de investimentos para a expansão do sistema de distribuição. Como consequência da redução de perdas, verifica-se a redução dos fluxos de potências nos condutores, adiando necessidades de reforços na rede;
- Melhoria na qualidade da energia. A RSDEE melhora o perfil de tensão dos sistemas;
- Adiamiento da necessidade de ampliação da capacidade de transmissão. A RSDEE pode reduzir o carregamento de linhas de transmissão em horários de pico, aumentando a capacidade de transmissão;

- Adiantamento da ampliação da capacidade de geração. Como a demanda é reduzida, são necessárias menos unidades de geração operando no horário de pico;
- Redução do uso de combustíveis. Ao reduzir as perdas no sistema, reduz-se a necessidade de geração de energia a partir de fontes não renováveis, resultando em uma economia no uso de combustíveis fósseis;
- Benefícios ambientais. A redução no uso de combustíveis fósseis consequentemente reduz a poluição.

Fica evidente a importância do problema de RSDEE para minimização de perdas. Portanto, a proposta deste trabalho é empregar um algoritmo em estrutura *branch and bound* para resolver o problema de RSDEE. Assim, são objetivos deste trabalho:

- Revisão e análise dos conceitos assumidos no trabalho de Merlin e Back (1975), em que os autores desenvolveram dois métodos de solução para o problema de RSDEE: um algoritmo heurístico construtivo (AHC) e um algoritmo em estrutura *branch and bound*.
- Desenvolver um algoritmo em estrutura *branch and bound* para resolver o problema de RSDEE;
- Utilizar a proposta de Glover e Zions (1965) para controlar a árvore de *branch and bound*;

Deste modo, o trabalho está estruturado da seguinte forma:

No presente Capítulo é apresentada uma introdução sobre o problema de RSDEE, suas características, objetivos e restrições. Também é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os principais trabalhos que abordam o problema de RSDEE.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão do trabalho de Merlin e Back (1975), no qual os autores desenvolveram duas metodologias. A primeira metodologia discutida é o AHC e, é realizado um teste no sistema de 14 barras como exemplo ilustrativo. Posteriormente é apresentado o algoritmo em estrutura *branch and bound* proposto pelos autores e também discussões sobre a metodologia.

No Capítulo 3 é apresentado o algoritmo de Prim: a teoria, o algoritmo para o problema de RSDEE e um exemplo ilustrativo. O algoritmo de Prim para o problema de RSDEE será utilizado na metodologia que é proposta neste trabalho.

No Capítulo 4 é apresentado e discutido em detalhes os algoritmos em estrutura *branch and bound* propostos. É realizado um teste como exemplo ilustrativo para o sistema de 14 barras.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos pela metodologia proposta para os sistemas de 33, 69, 84 e 136 barras.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões.

No Anexo A estão os dados completos dos sistemas apresentados no trabalho.

No Anexo B são apresentados os cálculos de problemas de fluxo de carga que são utilizados no decorrer deste trabalho.

1.1 O PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Os sistemas de distribuição possuem estrutura malhada, entretanto operam em estrutura radial. A característica de estrutura malhada dos sistemas de distribuição permite que reconfigurações sejam realizadas para atingir objetivos propostos, como isolar faltas no sistema, realizar manutenções preventivas e, o que será discutido, minimizar perdas.

Em uma determinada configuração, o sistema contém um conjunto de circuitos que estão energizados e estes formam uma configuração radial que, do ponto de vista da teoria de grafos, pode ser chamada de árvore geradora. A reconfiguração para minimização de perdas consiste em realizar manobras adequadas entre as chaves de interconexão dos circuitos, trocando circuitos não energizados por circuitos energizados, levando a outra configuração, com intuito de encontrar a configuração radial que produza perdas mínimas de potência no sistema de distribuição.

Uma configuração radial é, do ponto de vista da teoria dos grafos, uma árvore geradora, então o que a reconfiguração pretende obter é uma árvore geradora que minimize as perdas do sistema de distribuição, satisfazendo às restrições de:

- Limites de tensão nas barras do sistema;
- Capacidade de corrente nos alimentadores;
- Das duas leis de Kirchhoff sistematizadas através do fluxo de carga e;
- Que a configuração se matenha operando em estrutura radial.

Neste trabalho, desenvolve-se um algoritmo em uma estrutura *branch and bound*, no qual a árvore binária de soluções é controlada baseada na proposta de Glover e Zions (1965) para resolver o problema de RSDEE. Para melhorar a esquematização do problema de RSDEE, classificam-se as restrições em duas categorias (POSSAGNOLO, 2015):

- i.* Restrições topológicas, que impõem que uma proposta factível deve ser conexa e radial;

- ii. Restrições operacionais, que impõem que as propostas de solução devem satisfazer as leis naturais (as duas leis de Kirchhoff) e os limites de operação do sistema (limites de corrente elétrica nos alimentadores e limites de módulo de tensão nas barras do sistema elétrico).

Desta forma, o algoritmo em estrutura *branch and bound* controla as restrições de radialidade da configuração e, um algoritmo de fluxo de carga avalia a qualidade de cada proposta de solução e as violações das restrições operacionais.

1.1.1 Modelo matemático do problema de RSDEE

A formulação matemática do problema de RSDEE considerando a minimização de perdas ativas, é modelada como um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM) e pode ser escrito da seguinte forma (LAVORATO et al., 2012):

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_l} g_{ij} x_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (1)$$

Sujeito a:

$$P_i^S - P_i^D - \sum_{j \in \Omega_{b_i}} x_{ij} P_{ij} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (2)$$

$$Q_i^S - Q_i^D - \sum_{j \in \Omega_{b_i}} x_{ij} Q_{ij} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (3)$$

$$\underline{V} \leq V_i \leq \bar{V} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (4)$$

$$I_{r_{ij}}^2 + I_{m_{ij}}^2 \leq x_{ij} \bar{I}_{ij}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (5)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_l} x_{ij} = nb - 1 \quad (6)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (7)$$

No modelo (1)-(7), a função objetivo representada pela equação (1) é do tipo minimização, sendo o objetivo minimizar as perdas ativas do sistema de distribuição de energia elétrica, em que g_{ij} é a condutância do ramo ij , x_{ij} define o estado de operação da chave do ramo ij e vale 0 se aberto ou 1 se fechado, V_i é o módulo da tensão na barra i e θ_{ij} é a diferença angular entre as tensões das barras i e j .

As equações (2) e (3) correspondem ao balanço de potência ativa e reativa, respectivamente, em que P_i^S e Q_i^S representam as potências ativa e reativa fornecidas pela subestação na barra i , P_i^D e Q_i^D representam as demandas ativa e reativa na barra i e P_{ij} e Q_{ij} representam os fluxos de potência ativa e reativa pelo ramo ij que são obtidas pelas leis de Kirchhoff, as quais são

calculadas utilizando (8)-(9):

$$P_{ij} = V_i^2 g_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (8)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 b_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (9)$$

A equação (4) corresponde aos limites dos módulos de tensão inferior e superior nas barras do sistema elétrico, em que \underline{V} e \bar{V} representam os limites dos módulos de tensão inferior e superior nas barras do sistema elétrico.

A equação (5), \bar{I}_{ij} refere-se ao fluxo máximo de corrente permitido no ramo ij , I_{rij} e I_{mij} representam as partes real e imaginária do fluxo de corrente no ramo ij , as quais são calculadas utilizando (10)-(11):

$$I_{rij} = g_{ij}(V_i \cos \theta_i - V_j \cos \theta_j) - b_{ij}(V_i \sin \theta_i - V_j \sin \theta_j) \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (10)$$

$$I_{mij} = g_{ij}(V_i \sin \theta_i - V_j \sin \theta_j) - b_{ij}(V_i \cos \theta_i - V_j \cos \theta_j) \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (11)$$

Nas equações (8)-(11), b_{ij} é a susceptância do condutor entre as barras i e j .

Na equação (6) é a condição necessária para a radialidade do sistema, em que nb é o número de barras do sistema de distribuição e (7) indica a natureza binária da variável de decisão x_{ij} . Segundo Lavorato et al. (2012), as restrições (2) e (3) em conjunto com (6), garantem que uma solução factível do problema seja radial se as demandas de todas as barras forem diferentes de zero.

No modelo (1)-(11), os conjuntos são: Ω_b que representa o conjunto de barras do sistema, Ω_{b_i} representa o conjunto de barras conectadas à barra i e Ω_l representa o conjunto de ramos do sistema.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção apresenta-se uma revisão bibliográfica de trabalhos que utilizam metodologias para resolver o problema de RSDEE. Diversos métodos têm sido propostos para resolver o problema de RSDEE, em sua maioria com o objetivo de reduzir as perdas de potência ativa nos sistemas. A seguir são referidas as principais contribuições, cujas metodologias são classificadas como: métodos heurísticos, meta-heurísticas e métodos de otimização clássica.

1.2.1 Métodos heurísticos

Os autores Merlin e Back propuseram pela primeira vez, em 1975, o conceito de reconfiguração para redução de perdas ativas no sistema de distribuição de energia elétrica. Nesse trabalho, dois métodos de resolução para o problema de reconfiguração foram apresentados: um

algoritmo heurístico construtivo (AHC) e um algoritmo de otimização clássica. O AHC proposto consiste em fechar todas as chaves do sistema, tornando-o malhado, e em seguida resolver um problema de fluxo de carga com o objetivo de obter o fluxo de potência em cada ramo. O ramo que apresenta menor fluxo é candidato a ter sua chave de interconexão aberta, uma vez que, segundo os autores, este produz a menor mudança na distribuição de fluxo em relação à topologia malhada. Caso a abertura do ramo deixe o sistema desconexo, o próximo ramo com menor fluxo é analisado. O procedimento é repetido até que um sistema radial seja encontrado. A técnica ficou conhecida como "abertura sequencial de chaves".

Em Civanlar et al. (1988) os autores propuseram uma técnica heurística denominada de troca de ramos ou *branch exchange* para redução de perdas no sistema. A estratégia consiste em modificar uma configuração já radial, alternando os estados das chaves de interconexão dos ramos de forma que o sistema se mantenha radial. Através de uma fórmula aproximada obtém-se a variação das perdas resultante da transferência de um grupo de cargas de um alimentador para outro. Para que seja possível a redução de perdas na rede, deve existir uma queda de tensão entre as extremidades de um ramo com chave aberta. A carga na extremidade de maior queda de tensão desta chave aberta deve ser transferida para a outra extremidade. O procedimento é executado até que não se tenha trocas candidatas capazes de reduzir as perdas.

Shirmohammadi e Hong (1989) propuseram um algoritmo heurístico construtivo para a redução de perdas na rede com base no trabalho de Merlin e Back (1975). Partindo de uma rede malhada, realiza-se um cálculo de fluxo de carga e a chave do ramo com menor valor de corrente que mantém a rede conexa é aberta. O processo se repete até que um sistema radial seja encontrado. Diferentemente do trabalho de Merlin e Back (1975), os autores incluíram restrições de nível de tensão nas barras e fluxo máximo nos ramos.

A proposta de Baran e Wu (1989) é baseada no método de Civanlar et al. (1988), com objetivos de reduzir as perdas e realizar o balanceamento de cargas. A proposta consiste em realizar um aprimoramento na troca de ramos, utilizando dois métodos aproximados para o cálculo de fluxo de carga. Os autores apresentam também uma nova fórmula para realizar o cálculo das perdas resultantes de uma troca de ramos em um laço, em que os fluxos de potências ativas são incluídos explicitamente, sendo possível sua utilização em sistemas mal compensados.

Os autores Goswami e Basu (1992) desenvolveram um algoritmo heurístico construtivo, visando uma melhoria do trabalho de Shirmohammadi e Hong (1989), considerando a minimização de perdas. O trabalho de Shirmohammadi e Hong (1989) parte de uma rede malhada e em cada passo abre a chave de um ramo do sistema até obter um sistema radial. A proposta de Goswami e Basu (1992) inicia com uma rede radial e fecha a chave de um ramo aberto, introduzindo uma malha no sistema, que volta para a configuração radial ao abrir a chave da malha que deixa a configuração da rede com perda mínima. O procedimento é realizado para todos os laços do sistema.

Gomes et al. (2005) desenvolveram uma metodologia formada por dois procedimentos para determinar a configuração de perda mínima no sistema. No primeiro, parte-se de um sistema malhado e em cada passo a chave de um ramo é aberta até que se obtenha uma configuração radial. O segundo procedimento é um refinamento com o objetivo de encontrar uma configuração que reduza as perdas obtidas pelo primeiro procedimento, por meio da técnica *branch exchange*.

Em Ababei e Kavasseri (2011) os autores propuseram um algoritmo heurístico utilizando o procedimento *branch exchange*, baseado em problemas de fluxo máximo e custo mínimo (*minimum cost maximum flow*). Além disso, é proposto uma metodologia para estimar as perdas nos sistemas, baseada em uma técnica de caminhos aleatórios (*random walks*).

Em Raut e Mishra (2017) os autores propuseram um algoritmo heurístico simples de troca de ramos, para reduzir de perdas e melhorar os perfis de tensão dos sistemas. Nessa estratégia é realizada, passo a passo, uma troca de *status* dos ramos de um mesmo laço independente, de forma a encontrar a troca que leva à melhor solução radial.

Em Jakus et al. (2020) os autores combinam os algoritmos heurísticos de troca de ramos e o algoritmo de Kruskal para gerar uma solução inicial eficiente e, em seguida um algoritmo genético para buscar a melhor solução para o problema. Os autores consideram minimizar as perdas e a minimização do índice de carregamento do sistema.

1.2.2 Meta-heurísticas

Em Chiang e Jean-Jumeau (1990b) os autores consideram tanto a redução de perdas como o balanceamento de cargas para reconfiguração. Na formulação do problema, o número de operações de chaveamento é colocado como uma restrição. Para solucionar o problema, os autores utilizam uma metodologia com dois estágios, baseada na meta-heurística *simulated annealing* e o método ϵ -restrição para a otimização multi-objetivo. Além disso, dois métodos de cálculo de fluxo de carga são utilizados: o método de varredura e o desacoplado rápido.

Guimarães (2005) desenvolveu um algoritmo de Busca Tabu para resolver o problema de RSDEE, com objetivos de aumentar a margem de segurança da rede com relação à estabilidade de tensão e minimizar as perdas. O método inicia com uma configuração factível qualquer ou uma configuração de boa qualidade através do algoritmo de Shirmohammadi e Hong (1989). Observou-se que utilizando uma solução inicial gerada pelo método heurístico são obtidas soluções de melhor qualidade.

Zvietcovich (2006) desenvolveu dois algoritmos de Busca em Vizinhança Variável, um VNS (do inglês, *Variable Neighborhood Search*) e um VND (do inglês, *Variable Neighborhood Descent*), com o objetivo de reduzir as perdas ativas no sistema. O processo de solução parte de uma solução radial e percorre a vizinhança das soluções com estratégias de busca local baseadas

no algoritmo heurístico de Goswami e Basu (1992).

Em Carreno et al. (2008) um algoritmo genético de *Chu-Beasley* é proposto com objetivo de minimizar as perdas do sistema. Um operador de recombinação que gera somente topologias radiais é implementado, de forma a reduzir o espaço de busca.

No trabalho de Oliveira et al. (2011) é desenvolvido uma metodologia GRASP (*Greedy Randomize Adaptive Search Procedure*) para minimizar as perdas ativas. Para a fase construtiva, é utilizado um algoritmo AHC generalizado baseado no trabalho de Merlin e Back (1975) e para a fase de melhoria local, é utilizado um algoritmo heurístico proposto por Carreno et al. (2008). Os testes realizados em sistemas elétricos de médio e grande porte apresentam bons resultados.

Franco et al. (2012) desenvolveram um algoritmo de Busca Tabu para redução de perdas no sistema. Os autores utilizam o algoritmo de Prim para gerar a solução inicial. Na Busca Tabu, a função objetivo das soluções vizinhas é estimada utilizando a fórmula aproximada de Baran e Wu (1989). Além disso, é realizado o cálculo do ponto de operação para a melhor solução de uma vizinhança, tornando a metodologia rápida.

No trabalho de Rupolo (2013) é proposto um algoritmo de busca dispersa com o objetivo principal de minimizar as perdas de potência ativa no sistema. O autor utilizou o modelo de cargas com potência constante e também o modelo exponencial de cargas. Verificou-se um bom desempenho do algoritmo para os sistemas avaliados.

Em Souza (2013), foi desenvolvida uma meta-heurística GRASP especializada com o objetivo de reduzir as perdas ativas do sistema. Inicialmente todas as chaves de interconexão do sistema de distribuição estão abertas e a cada passo do algoritmo fecha-se uma chave de acordo com um índice de sensibilidade obtido através da solução de um problema de programação não linear. O processo de solução continua até que uma solução factível seja construída e então ocorre um processo de busca local a partir desta solução.

Em Possagnolo (2015) desenvolvidos algoritmos baseados na meta-heurística de busca em vizinhança variável, considerando demanda fixa e demanda variável. O objetivo é a minimização de perdas no sistema. Foram desenvolvidas quatro versões da meta-heurística de busca em vizinhança: *Basic Variable Neighborhood Search* (BVNS), *Variable Neighborhood Descent* (VND), *Reduced Variable Neighborhood Search* (RVNS) e *General Variable Neighborhood Search* (GVNS).

Em Peralta (2018) é considerada a redução de perdas no sistema. É aplicado um algoritmo genético de chaves aleatórias viciadas e um algoritmo de Prim como decodificador de cada vetor de chaves aleatórias. No desenvolvimento da metodologia o cálculo do fluxo de carga radial utilizado é o método de varredura.

1.2.3 Otimização Clássica

No trabalho de Merlin e Back, de 1975, um dos algoritmos propostos pelos autores é de otimização clássica que possui estrutura *branch and bound*, com o objetivo de minimizar as perdas ativas do sistema. Na metodologia, como limitante inferior são utilizadas as perdas da configuração malhada e para o limitante superior o valor de perdas mínimas da configuração radial encontrada com a heurística construtiva proposta pelos autores neste mesmo trabalho.

No trabalho de Glamocanin (1990) o problema de RSDEE é resolvido como um problema de transporte com custos quadráticos utilizando o método *simplex*. Com o objetivo de minimizar as perdas do sistema, o método obtém inicialmente uma configuração radial através da linearização de perdas e utiliza do método *simplex* para melhorar a solução.

Em Cabezas (2007), são apresentadas duas formulações para o problema RSDEE, a primeira considera as cargas com fator de potência individual e na segunda é feita a compensação reativa nas barras que tiverem um valor de tensão menor que a estabelecida e se introduz a instalação de um capacitor nessas barras para melhorar o perfil de tensão da rede. São desenvolvidos dois tipos de algoritmos: um algoritmo de busca em profundidade e um algoritmo em estrutura *branch and bound*. Na metodologia em estrutura *branch and bound*, inicialmente a topologia é malhada, escolhe-se a chave que será aberta com base no incremento aproximado de perdas que essa chave aberta causará, a chave escolhida é a que produz o menor incremento de perdas. São então gerados dois subproblemas: um com a chave aberta e outro com a chave fechada. Verifica-se se o subproblema com a chave aberta é desconexo para ser descartado, caso seja conexo, utiliza-se o método de Newton para obter o valor total das perdas. Há mais dois testes que podem descartar um subproblema: o teste onde a perda total do subproblema é maior que a incumbente e o teste de atualização de uma nova incumbente. Após sondar um subproblema, executa-se o retrocesso para analisar os subproblemas em aberto. Para esta metodologia foi realizado um teste para o sistema de 33 barras de Baran e Wu (1989). O algoritmo não encontrou resultados adequados para um limite de tempo em um sistema de grande porte.

Em Lavorato et al. (2012) os autores apresentam uma revisão da literatura e uma proposta para incorporar de maneira simples as restrições de radialidade do sistema no modelo matemático. O trabalho contorna um problema que tornou difícil, por muito tempo, a modelagem matemática para o problema de reconfiguração.

Em Jabr et al. (2012) são desenvolvidos dois modelos para resolver o problema de RSDEE, sendo eles um Modelo Cônico de Segunda Ordem Inteiro Misto (PCSOIM) e um modelo de Programação Linear Inteiro Misto (PLIM). Os modelos foram resolvidos utilizando *solvers* comerciais. Na comparação dos dois modelos, constata-se que o PCSOIM é mais rápido para encontrar uma solução factível, sendo mais adequado para aplicações em tempo real e o modelo PLIM encontra melhores soluções para sistemas de grande porte.

Em Freitas et al. (2019) os autores consideram a redução de perdas no sistema. A metodologia híbrida desenvolvida é composta por uma técnica heurística *Fix and Optimize* e Programação Quadrática Inteira Mista (PQIM), de forma que a técnica heurística resolve os submodelos de PQIM.

2 REVISÃO DO TRABALHO DE MERLIN & BACK

No presente capítulo são apresentados os detalhes do trabalho proposto por Merlin & Back em 1975 para resolver o problema de RSDEE. Os autores desenvolveram duas metodologias: um AHC e um algoritmo em estrutura *branch and bound*.

Inicialmente, apresenta-se o algoritmo heurístico e em seguida são apresentados os detalhes do algoritmo em estrutura *branch and bound*. Para compreender a segunda proposta, inicialmente são abordadas as definições utilizadas pelos autores. Em seguida, apresenta-se o processo de busca que o algoritmo realiza para encontrar a solução ótima. Por último, apresenta-se uma breve análise sobre a metodologia.

De forma geral, a análise do trabalho de Merlin e Back (1975) é essencial, pois a metodologia proposta neste trabalho é inspirada nos conceitos propostos pelos autores.

2.1 A HEURÍSTICA CONSTRUTIVA

O AHC de Merlin e Back (1975) proposto para resolver o problema de RSDEE consiste em um procedimento heurístico que inicia o processo de busca com uma configuração malhada e a cada passo adiciona um ramo aberto à solução, até que seja obtida uma solução radial.

Na literatura, grande parte das estratégias utilizadas para o problema de RSDEE adota algum tipo de procedimento heurístico. Por ser um método de otimização simples, robusto e que requer um baixo esforço computacional, o AHC, em especial o de Merlin e Back (1975), foi utilizado como referência e inspiração em trabalhos como Shirmohammadi e Hong (1989) e Oliveira et al. (2011).

Os resultados obtidos com a heurística de Merlin e Back (1975) são aproximados e muitas vezes identificam ótimos locais, nem sempre atingem o ótimo global para o problema de reconfiguração, principalmente para sistemas de grande porte. No entanto, abordagens que utilizam como solução inicial uma configuração obtida por um método heurístico apresentam desempenho melhorado.

2.1.1 Algoritmo Heurístico Construtivo

O AHC de abertura sequencial de chaves proposto por Merlin e Back (1975) possui a seguinte estrutura:

Início: Todas as chaves do sistema estão fechadas, ou seja, a configuração do sistema é malhada e representa a topologia corrente inicial;

Repetir os passos (i) – (iii) até que a topologia corrente radial seja obtida:

- i. Calcular o fluxo de carga para sistemas fracamente malhados para a topologia corrente;
- ii. Identificar o ramo com menor fluxo e que se for aberto mantém o sistema conexo;
- iii. Abrir a chave do ramo identificado e atualizar a topologia corrente;

Calcular a função objetivo da solução obtida resolvendo um problema de fluxo de carga para sistemas radiais.

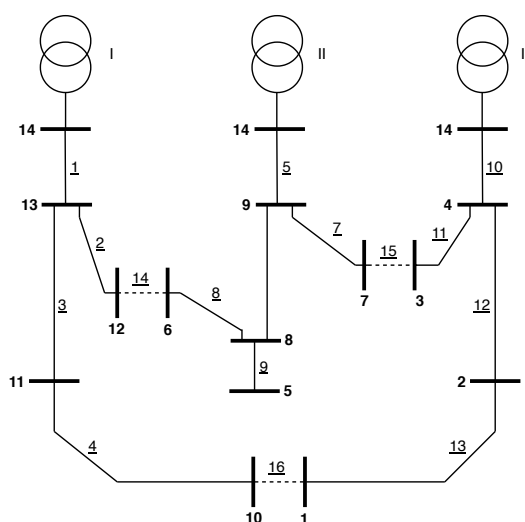
A heurística proposta pelos autores visa obter uma boa solução de forma que o sistema seja perturbado o mínimo possível quando comparado ao sistema com a topologia malhada.

Nota-se que no desenvolvimento do algoritmo são necessários cálculos de fluxo de carga. Para utilizar a metodologia dos autores e também qualquer outro método apresentado neste trabalho que necessite do processamento de cálculos de fluxo de carga para sistemas fracamente malhados e sistemas radiais, é utilizada a metodologia proposta por Shirmohammadi et al. (1988), descrita no Anexo B.

2.1.2 Exemplo ilustrativo

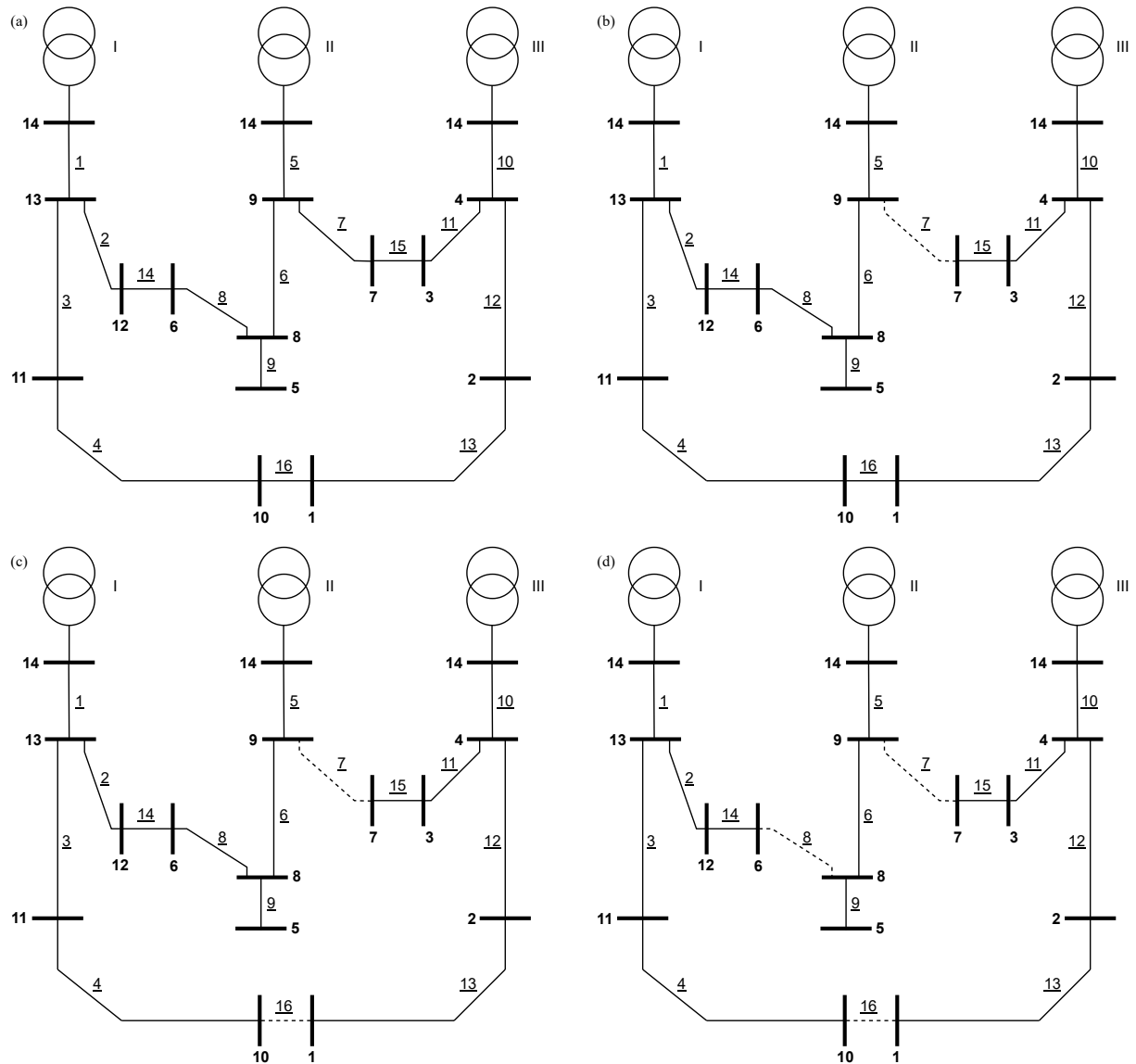
Como exemplo ilustrativo do AHC de abertura sequencial de chaves, é utilizado nesta seção o sistema de 14 barras apresentado por Civanlar et al. (1988), ilustrado na Figura 1, e os dados completos do sistema encontram-se no Anexo A. Na Figura 2 é ilustrada cada iteração do AHC aplicado ao sistema.

Figura 1 - Sistema de 14 barras.



Fonte: Civanlar et al. (1988)

Figura 2 - Passo a passo do AHC para o sistema de 14 barras.



Fonte: Elaborado pela autora.

Como ilustrado na Figura 2, em a) o primeiro passo é alterar os estados de todas as chaves para fechado, tornando a configuração do sistema malhada, contendo três laços. É resolvido um problema de fluxo de carga para sistemas fracamente malhados, que identifica o ramo 7 como aquele que apresenta o menor fluxo e que se for aberto mantém o sistema conectado e este ramo é aberto, como ilustrado em b). Há agora dois laços no sistema e é resolvido novamente um problema de fluxo de carga para sistemas fracamente malhados e o ramo 16 é aberto, conforme ilustrado em c). Um problema de fluxo de carga para sistemas fracamente malhados é resolvido e é identificado que o desligamento de cada um dos primeiros quatro ramos com fluxo mínimo deixam o sistema desconexo, logo o quinto ramo com menor fluxo de carga que mantém o

sistema conexo ao ser aberto é selecionado, o ramo é o 8, conforme ilustrado em d). Neste passo, não há mais laços no sistema e então é processado o algoritmo de fluxo de carga para sistemas radiais e o algoritmo termina.

Na Tabela 1 apresenta-se a posição dos ramos em cada iteração do AHC, organizados do menor para o maior fluxo de carga, e a Tabela 2 apresenta os resultados de cada iteração da metodologia, também ilustrados pela Figura 3. A solução mostrada na Tabela 2 é a ótima.

Tabela 1 - Posição dos ramos livres em cada iteração para o sistema de 14 barras.

Iteração	Ramos
0	7, 16, 4, 15, 8, 11, 3, 14, 13, 12, 9, 2, 6, 10, 1, 5
1	16, 4, 15, 11, 8, 3, 14, 13, 12, 9, 2, 10, 6, 1, 5
2	15, 4, 11, 13, 8, 14, 12, 3, 9, 2, 10, 6, 5, 1
3	-

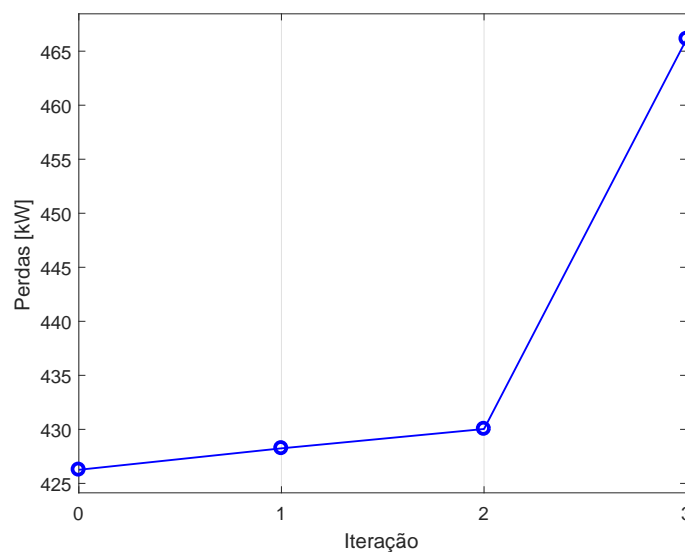
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 2 - Resultados do AHC para o sistema de 14 barras.

Iteração	Chaves abertas	Perdas [kW]
0	-	426,2587
1	7	428,2443
2	7, 16	430,0339
3	7, 16, 8	466,1267

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 3 - Evolução do AHC para o sistema de 14 barras.



Fonte: Elaborado pela autora.

Verifica-se que as perdas totais para o sistema com todas as chaves fechadas são de 426,2587

kW. Após três iterações é obtida uma configuração radial com 466, 1267 kW de perdas. Essa diferença de perdas pode ser atribuída ao fato de que, como discutido em Ritter (2014), o sistema de distribuição com todas as chaves fechadas geralmente representa a topologia com perdas mínimas. Entretanto, é possível que a topologia com todos os ramos fechados não seja a topologia com perdas mínimas.

2.2 O ALGORITMO EM ESTRUTURA BRANCH AND BOUND

O algoritmo em estrutura *branch and bound* de Merlin e Back (1975) para o problema de RSDEE consiste em um procedimento que se inicia com uma solução radial de boa qualidade obtida pelo AHC proposto pelos autores. A partir da solução inicial, a árvore de *branch and bound* de soluções é desenvolvida.

Os autores testaram a metodologia para sistemas de grande porte e segundo eles, obtiveram bons resultados em um tempo consideravelmente reduzido.

2.2.1 Premissas assumidas por Merlin & Back

A proposta do algoritmo em estrutura *branch and bound* para resolver o problema de RS-DEE com o objetivo de minimizar as perdas dos sistemas, apresenta algumas particularidades. Para entender a metodologia é necessário conhecer as definições utilizadas por estes autores para realizar o processo de busca das soluções.

2.2.1.1 Definições

Merlin e Back (1975) definem os seguintes conjuntos e estruturas:

- D é o conjunto de subgrafos com $(n - 1)$ ramos do grafo completo G , sendo n o número de vértices do grafo (números de barras do sistema de distribuição). G é grafo representado pelas barras e os ramos do sistema de distribuição. Um subgrafo com $(n - 1)$ ramos cumpre com um dos requisitos para ser candidato a uma topologia radial. Portanto, o conjunto D é formado por todos os subgrafos que atendam um dos requisitos para ser uma topologia radial e uma parcela de D , formada por topologias conexas, são as topologias radiais.
- E é um subconjunto de D formado por elementos de D que possuem estrutura de árvore geradora, isto é, que tem $(n - 1)$ ramos e conexas. Em outras palavras, fazem parte do conjunto E todas as topologias radiais.

- $H(X', \Gamma)$ é uma estrutura em árvore *branch and bound* cujo nó inicial ou nó raiz é x_o . X' é o conjunto de nós da árvore de *branch and bound*. Γ é uma operação executada em X' onde cada nó $x' \in X'$ identifica os sucessores de x' na árvore de *branch and bound*.
- T identifica uma operação ou transformação de X' nos elementos de D .
- S identifica uma operação ou transformação de X' nos elementos de E de forma que $S(x') = T(x) \cap E, \forall x' \in X$. Em outras palavras, $S(x')$ é uma transformação que identifica uma topologia radial. Assim, S está associado com qualquer nó x' de H , isto é, o subconjunto de soluções possíveis (árvores geradores ou topologias radiais).

A árvore de *branch and bound* H deve ser estruturada de forma que cumpra as seguintes propriedades:

1. $T(x_o) = D$, o que significa que o subgrafo que representa x_o é um subgrafo com $(n - 1)$ ramos e, portanto, $S(x_o) = E$. Essa hipótese exige que o nó inicial seja um elemento de D com $(n - 1)$ ramos e cuja transformação identifique uma topologia radial. Essa hipótese faz com que Merlin e Back (1975) escolham a topologia radial encontrada pelo algoritmo heurístico construtivo desenvolvido por eles, como sendo x_o .
2. $(y \in \Gamma(x')) \cup S(y) = S(x')$, onde \cup representa o conjunto de ramos. Essa premissa pode ser interpretada como uma condição de que todas as topologias radiais podem ser identificadas percorrendo a árvore de *branch and bound*.
3. $y, z \in \Gamma(x') \Rightarrow S(y) \cap S(z) = \phi$. Essa hipótese pode ser interpretada como a exigência de que a árvore de *branch and bound* não pode representar uma mesma topologia mais de uma vez.
4. $\Gamma(x') = \phi \Rightarrow |\Gamma(x')| = 1$, isto é, $|S(x')| \leq 1$. Essa hipótese significa que o nó identificado pela transformação W indica que a partir do nó x' existe, no melhor caso, apenas uma topologia radial.

Seja v uma função que relaciona alguma topologia radial da árvore de *branch and bound* encontrada a partir de uma rede malhada com o seguinte valor de perdas:

$$v(e) = \sum_{j \in e} r_j t_j^2 \quad e \in E \quad (12)$$

Sendo e uma topologia radial, j são os ramos da topologia radial.

Nesse contexto, busca-se encontrar uma topologia radial $e^* \in E$ tal que:

$$v(e^*) = \min_{e \in E} v(e) \quad (13)$$

A estrutura *branch and bound* H deve ser construída de tal forma que exista uma correspondência bijectiva entre os nós terminais da árvore de *branch and bound* e os elementos de D .

Deve-se observar que todas essas hipóteses levantadas por Merlin e Back (1975) apenas exige que a árvore de *branch and bound* deve gerar de maneira implícita ou explícita, todas as topologias radiais iniciando o processo de busca a partir da topologia radial encontrada pelo algoritmo heurístico de Merlin e Back (1975).

2.2.1.2 Processo de busca para encontrar uma solução ótima

O objetivo da metodologia em estrutura *branch and bound* é encontrar uma topologia radial com perdas mínimas e^* analisando apenas uma pequena parcela da árvore de *branch and bound* chamada de H .

Para que o método seja eficiente, deve-se calcular em cada nó x' da árvore de *branch and bound*, uma solução limitante inferior $v(x')$ e uma solução limitante superior $V(x')$ para as perdas ativas da topologia identificada por x' na árvore de *branch and bound*. Assim, essas soluções limitantes determinam um intervalo do valor de perdas da melhor topologia radial existente em $S(x')$ que representa o conjunto de topologias radiais que podem ser encontradas a partir da topologia x' . Deseja-se que a diferença entre o limitante superior $V(x')$ e a limitante inferior $v(x')$ seja a menor possível.

Como uma limitante inferior $v(x')$ é utilizado o valor de perdas do sistema de distribuição da rede malhada, que representa uma proposta de solução associada a um nó da árvore de *branch and bound*. Para a limitante superior $V(x')$ é utilizado o valor de perdas da topologia radial encontrada pelo algoritmo heurístico construtivo proposto pelos autores.

Em cada passo do procedimento em estrutura *branch and bound*, existe um conjunto C formado pelos nós da árvore H , chamados de nós candidatos a separação, isto é, o conjunto de nós ativos e que ainda não foram sondados. Neste contexto, são realizados três procedimentos em sequência.

1. Eliminação

Alguns nós de C podem ser eliminados (sondados) quando dentre as topologias radiais existentes nos futuros nós descendentes desse nó não se encontra a topologia ótima. Assim, um nó $x' \in C$ pode ser sondado em dois casos:

- Se existe uma topologia $y \in C$ tal que $v(x') \geq V(y)$.

Se existe certeza que a limitante inferior de uma topologia x é maior ou igual que a limitante superior de qualquer topologia y que representa um nó ativo (não sondado). Deve-se observar que essa afirmação é válida desde que $V(y)$ seja a limitante

superior de uma topologia radial. No algoritmo *branch and bound* um nó ativo pode ser sondado desde que $v(x') \geq v(x^*)$ onde $v(x^*)$ é a incumbente (melhor solução encontrada até o momento durante o processo).

- Se $|S(x')| = 0$. Significa que não existe topologia radial nova que pode ser encontrada a partir da topologia x' .

2. Escolha do nó para separação

De todos os nós ativos da estrutura *branch and bound*, o próximo nó a ser escolhido para análise é um elemento de $x' \in C$ escolhido usando a seguinte relação:

$$v(x') = \min_{y \in C} v(y) \quad (14)$$

Assim, o nó escolhido é aquele nó ativo que tem a menor limitante inferior.

Para acelerar o processo, entretanto, pode ser conveniente usar a regra LIFO, isto é, usar para separação o último nó gerado desde que a limitante inferior deste nó candidato não seja muito maior que $v(y)$.

3. Escolha da variável para separação de um subproblema em dois novos subproblemas

- Um subproblema é gerado fixando um ramo, ainda não fixado, no valor de 0, ou seja, fixar o ramo em estado aberto na topologia associada a esse nó.
- Um subproblema é gerado fixando um ramo, ainda não fixado, no valor de 1, ou seja, fixar o ramo em estado fechado na topologia associada a esse nó.

Assim, um ramo ainda não fixado deve ser fixado como aberto ou fechado. Para acelerar o processo de eliminação dos nós ativos, escolhe-se aquele ramo não fixado com o maior fluxo na resolução do problema de fluxo de carga do sistema malhado que apresenta as perdas mínimas.

2.2.2 Análise crítica da proposta de Merlin & Back

Dada a análise da proposta em estrutura *branch and bound* de Merlin e Back (1975), há dúvidas sobre a forma em que foi implementado o algoritmo. São elas:

- Não é descrita claramente a forma com que é resolvido o problema de fluxo de carga associado com a topologia de um nó da árvore de *branch and bound*.
- A proposta de escolher o próximo subproblema a ser analisado selecionando o que possui a menor solução limitante inferior, revela que o controle da árvore de *branch and bound* deve ser realizado utilizando estratégias de controle de algoritmos *branch and bound* convencionais.

- Não fica evidente na proposta, a informação da solução incumbente e seu papel como estratégia de sondagem.
- Há poucas estratégias de sondagem.

Há propostas na metodologia que se mostram bastante interessantes. São elas:

- A proposta de escolher o ramo não fixado com o maior fluxo de carga obtido após o processamento de um fluxo de carga para o sistema malhado.
- A proposta de escolher o nó raiz da árvore de *branch and bound* como sendo a proposta de solução do algoritmo heurístico construtivo proposto pelos autores.

Dados os pontos expostos, alguns podem ser reavaliados e modificados, como:

- A escolha de um método eficiente para resolução dos problemas de fluxo de carga.
- Novas estratégias de sondagem.
- Uma forma mais dinâmica de realizar o controle da árvore de *branch bound*.

3 ALGORITMO DE PRIM

As heurísticas são técnicas de otimização conhecidas por apresentarem um tempo de execução razoável na solução de problemas e que encontram boas soluções, sem garantir que a solução seja a ótima global.

O método de Prim, demonstrado pela primeira vez por Prim (1957), é uma técnica de otimização caracterizada como uma heurística construtiva que identifica uma árvore geradora mínima de um grafo malhado através da escolha de pesos que são atribuídos aos ramos dos árvore geradora. É um método bastante utilizado para a resolução de problemas complexos e é comumente integrado à técnicas de meta-heurísticas mais sofisticadas, sendo principalmente utilizado para a geração de uma solução inicial de qualidade.

O algoritmo de Prim é exato no problema de árvore geradora mínima em grafos, ou seja, encontra sempre a solução ótima dos problemas de árvore geradora mínima onde os pesos são conhecidos. No problema de reconfiguração, o Prim encontra apenas uma solução de boa qualidade para o problema de minimização de perdas, pois os pesos escolhidos não representam uma informação exata, isto é, a escolha de utilizar fluxo de potência como peso não é uma informação exata.

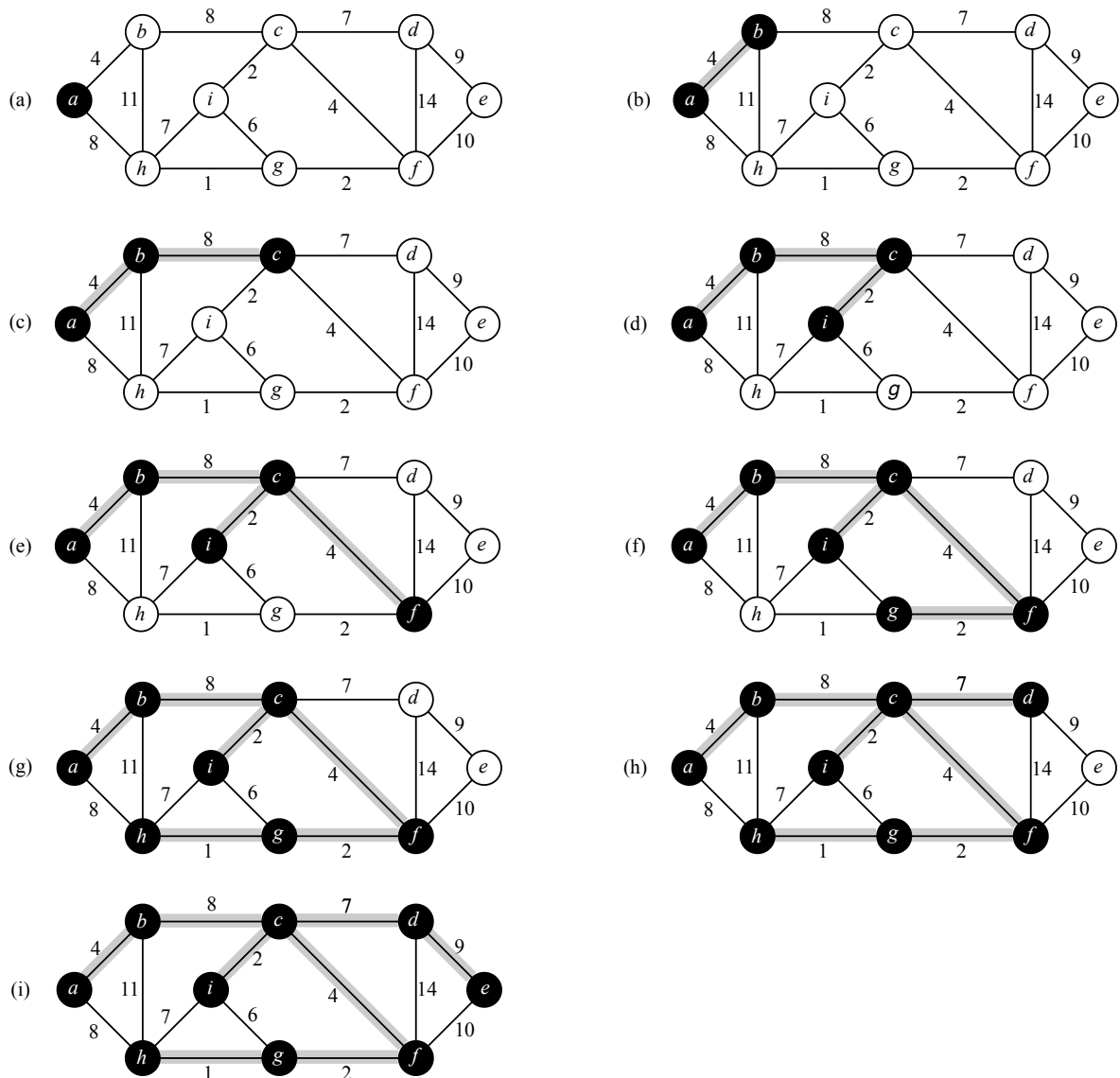
Neste capítulo é exposta a teoria do algoritmo de Prim, que é utilizada como base para a implementação de variações do algoritmo na metodologia, e é apresentada a adaptação do algoritmo para ser aplicado em problemas de RSDEE e também um exemplo do algoritmo de Prim para o problema de RSDEE no sistema de 14 barras de Civanlar et al. (1988).

3.1 TEORIA DE PRIM

O algoritmo de Prim tem como objetivo construir uma árvore geradora mínima para um grafo completo, sem direção e cujos ramos têm pesos que são números reais conhecidos. Em outras palavras, o algoritmo de Prim tem como objetivo construir uma árvore geradora mínima formada por ramos ordenadamente selecionados cuja soma de pesos seja mínima. A árvore geradora mínima começa com um nó raiz arbitrário e vai aumentando até que todos os nós sejam incluídos. Em cada etapa do algoritmo se adiciona um ramo que, usualmente, é o ramo que possui menor peso para os problemas de minimização.

De forma a demonstrar a teoria de Prim, na Figura 4 ilustra-se o passo a passo da construção de uma árvore geradora mínima genérica.

Figura 4 - Execução do algoritmo de Prim em um grafo.



Fonte: Adaptado de Cormen et al. (2012).

Na Figura 4, a árvore geradora mínima se inicia no nó "a". A partir do nó "a" define-se o conjunto de nós candidatos a serem conectados, que são todos os ramos que possuem um nó conectado e outro aberto. Sendo assim, os ramos "a-b" e "a-h" estão dentro do conjunto de nós candidatos e é escolhido o ramo que possui o menor custo, o ramo "a-b". Em cada iteração o algoritmo retorna para verificação dos pesos dos ramos candidatos, em caso de empate, o primeiro ramo a ser verificado é escolhido. O algoritmo encerra quando a árvore geradora mínima é formada.

3.2 ALGORITMO DE PRIM PARA O PROBLEMA DE RSDEE

O algoritmo de Prim é proposto para uma árvore geradora mínima. Para resolver o problema de RSDEE é feita uma adaptação para que o algoritmo encontre um subconjunto de ramos que são selecionados de acordo com seu máximo peso possível. Nesta adaptação, os ramos da árvore geradora são também os ramos do sistema de distribuição.

Os valores dos pesos para cada ramo da árvore geradora mínima são as potências aparentes obtidas resolvendo um problema de fluxo de carga para sistemas fracamente malhados. Os sistemas de distribuição operam de forma radial e os ramos mais apropriados para formar a topologia radial são aqueles em que a potência aparente é maior. Desta forma, o sistema sofrerá a menor perturbação possível levando a um valor total das perdas mais aproximado ao ótimo global do sistema malhado.

Os passos para encontrar uma topologia radial de boa qualidade do problema de RSDEE utilizando o algoritmo de Prim são os seguintes:

Etapa preliminar: Todas as chaves do sistema estão fechadas, ou seja, a configuração do sistema é malhada. São obtidas as potências aparentes de cada ramo com a resolução de um problema de fluxo de carga para sistemas fracamente malhados.

Início: O algoritmo inicia com todas as chaves dos ramos abertos e com pesos definidos para cada ramo é sua potência aparente. O nó da subestação é marcado.

Repetir os passos (i) e (ii) até que todos os nós tenham sido marcados, isto é, até que estejam conectados:

- i. De todos os ramos que tenham um nó terminal marcado e outro não marcado, escolha-se aquele com o maior peso e fecha-se a chave;
- ii. Marca-se o nó terminal, ainda não marcado, do ramo escolhido;

Calcular a função objetivo da solução obtida resolvendo um problema de fluxo de carga para sistemas radiais.

Em cada iteração do algoritmo, uma chave do sistema é fechada considerando os pesos. Deve-se observar que o algoritmo de Prim utiliza apenas pesos encontrados após resolver o problema de fluxo de carga dos sistemas malhados. Desta forma, o algoritmo de Prim está encontrando a topologia radial ótima para esses pesos escolhidos. Entretanto, essa topologia nem sempre é ótima para o problema de RSDEE, pois esses pesos indicam apenas uma tendência de que os ramos de maior peso levam a topologias radiais interessantes.

3.3 EXEMPLO ILUSTRATIVO

De forma a ilustrar o algoritmo para o problema de RSDEE, é utilizado o sistema de 14 barras de Civanlar et al. (1988) já exibido no capítulo anterior. Na Tabela 3 apresentam-se os ramos ordenados por seus respectivos índices de fluxos de carga, do maior para o menor, obtidos na etapa preliminar.

Tabela 3 - Índices para o algoritmo de Prim com o sistema de 14 barras.

Posição	Ramo	Índice	Posição	Ramo	Índice
1	5	11177,5983	9	14	2852,6752
2	1	11050,4321	10	3	2804,9863
3	10	7605,0655	11	11	2514,5484
4	6	7324,9791	12	8	2285,1896
5	2	5893,2497	13	15	1977,1982
6	9	4819,2076	14	4	1256,4669
7	12	3905,0614	15	16	796,3999
8	13	2947,9282	16	7	623,2851

Fonte: Elaborado pela autora.

A metodologia fecha os ramos na seguinte ordem: 5, 1, 10, 6, 2, 9, 12, 13, 14, 3, 11, 15 e 4. Os ramos que permanecem abertos na solução do problema são 7, 8 e 16, obtendo uma função objetivo de 466,1267 kW de valor de perdas total. Para este sistema o algoritmo encontra a solução ótima.

4 ALGORITMO EM ESTRUTURA *BRANCH AND BOUND*

Neste capítulo é apresentada a metodologia proposta para resolver o problema de RSDEE. O algoritmo possui estrutura *branch and bound* na qual a árvore de soluções é controlada utilizando a proposta de enumeração implícita de Glover e Zions (1965). A ideia básica da metodologia considerada é de que o problema de reconfiguração seja resolvido através de uma árvore de *branch and bound* binária que representa subproblemas nas quais ramos estão abertos e fechados no sistema.

Neste capítulo também é apresentada uma estratégia heurística que é inserida na metodologia com o objetivo de reduzir o espaço de busca da solução e assim reduzir o esforço computacional do algoritmo. Portanto, há duas versões da metodologia: a metodologia básica e a metodologia com redução do espaço de busca. Para ambas versões é resolvido um exemplo ilustrativo para o sistema de 14 barras, exibindo suas árvores de soluções.

No processo iterativo do algoritmo é necessário realizar o cálculo de problemas de fluxo de carga radiais (FCR) e fracamente malhados (FCFM), para sistemas radiais e fracamente malhados, respectivamente. Todos os algoritmos são implementados conforme apresentado no Anexo B.

4.1 GERAÇÃO DE UMA SOLUÇÃO INICIAL DE BOA QUALIDADE

O primeiro passo da metodologia consiste em determinar uma solução inicial. O desempenho da metodologia pode ser melhorado ao obter uma solução inicial de boa qualidade, e para isso, é proposto que essa obtenção aconteça em duas etapas.

Na primeira etapa é determinada uma topologia radial utilizando o AHC de Merlin e Back (1975), já discutido no Capítulo 2. Então, essa topologia radial passa para a próxima etapa onde é realizado um processo de melhoria local.

4.1.1 Melhoria local

A melhoria local é a segunda etapa para obtenção da solução inicial. Essa etapa tem como objetivo, como o nome sugere, de realizar uma busca local através de um esquema de troca de ramos vizinhos para melhorar a solução encontrada na primeira etapa e obter uma melhor função objetivo.

A melhoria local proposta acontece da seguinte forma: Para cada ramo que está aberto

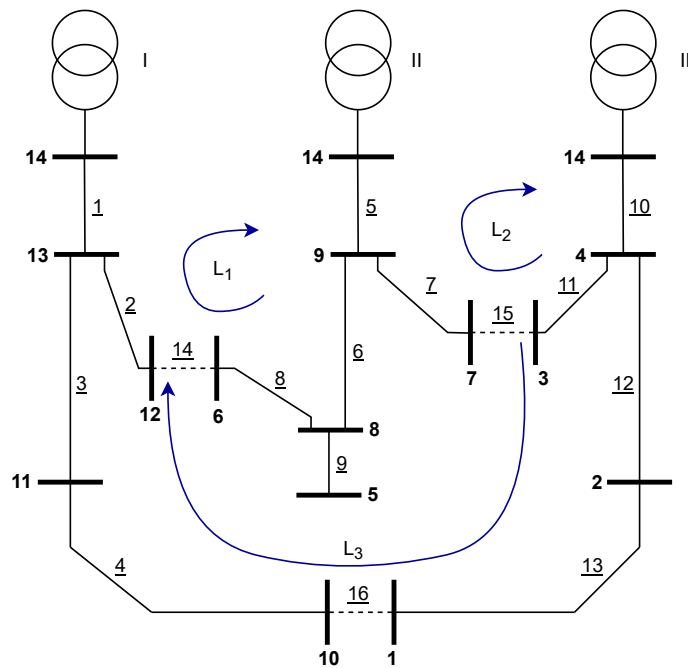
na topologia obtida com o AHC é identificado o laço fundamental formado quando este ramo estiver fechado. Desta forma, um dos ramos abertos é fechado e, para preservar a radialidade da configuração, um dos ramos adjacentes é aberto. Um problema de FCR é resolvido e a função objetivo dessa configuração vizinha é calculada. Cada vez que uma troca de ramos é realizada, as informações referentes à configuração vizinha são armazenadas e então retorna-se para a topologia gerada na primeira etapa. Todos os vizinhos da solução proveniente da primeira etapa são analisados. Após a análise de toda a vizinhança, a solução que possuir o menor valor de perdas é escolhida para ser a solução inicial.

Desta forma, na melhoria local, para cada ramo aberto da configuração radial gerada na primeira etapa:

1. Fechar o ramo e identificar o laço que foi formado;
2. Abrir o ramo que está diretamente conectado ao ramo que foi fechado no passo anterior (adjacentes ou vizinhos do lado esquerdo ou direito);
3. Calcular e armazenar as perdas da nova configuração;
4. Voltar para o estado de topologia radial gerada na primeira etapa. Verificar se há vizinhos que ainda não realizaram troca. Isto é feito para cada ramo aberto da topologia. Caso todos os vizinhos já tenham sido analisados, ir ao passo 5, caso contrário retorne ao passo 1;
5. De todas as novas configurações geradas e armazenadas, comparar o valor de perdas com a configuração obtida na primeira etapa com o AHC e selecionar a melhor para ser a solução inicial.

De forma a ilustrar a estrutura de vizinhança, utiliza-se o sistema de 14 barras ilustrado na Figura 5 com os ramos 14, 15 e 16 abertos, e valor de perdas de 511,4356 kW. Três laços independentes são identificados: o laço L_1 formado pelos ramos 1, 2, 5, 6, 8 e 14; L_2 pelos ramos 5, 7, 10, 11 e 15 e o L_3 por 1, 3, 4, 10, 12, 13 e 16. É apresentada a busca local do laço L_1 .

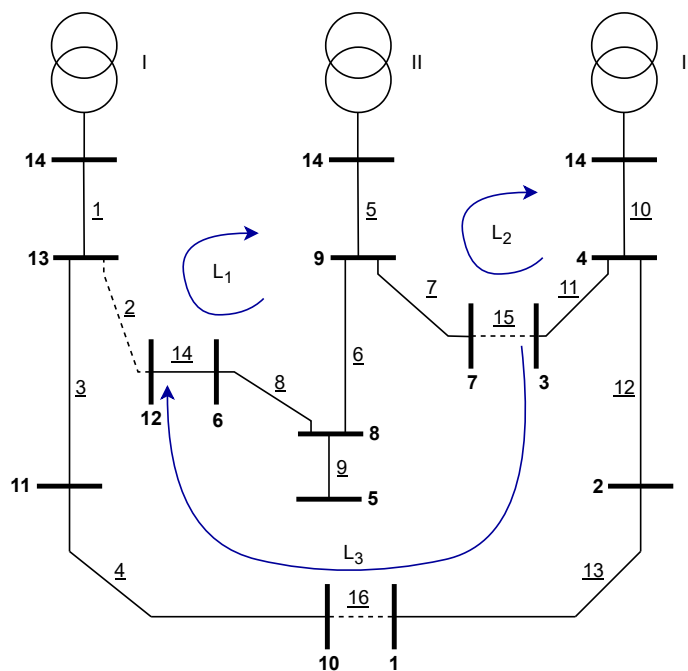
Figura 5 - Sistema de 14 barras com identificação de laços.



Fonte: Elaborado pela autora.

No laço L_1 , o primeiro passo é fechar o ramo 14. Abre-se um de seus ramos adjacentes: 2 ou 8. Começando então pelo ramo 2, conforme Figura 6.

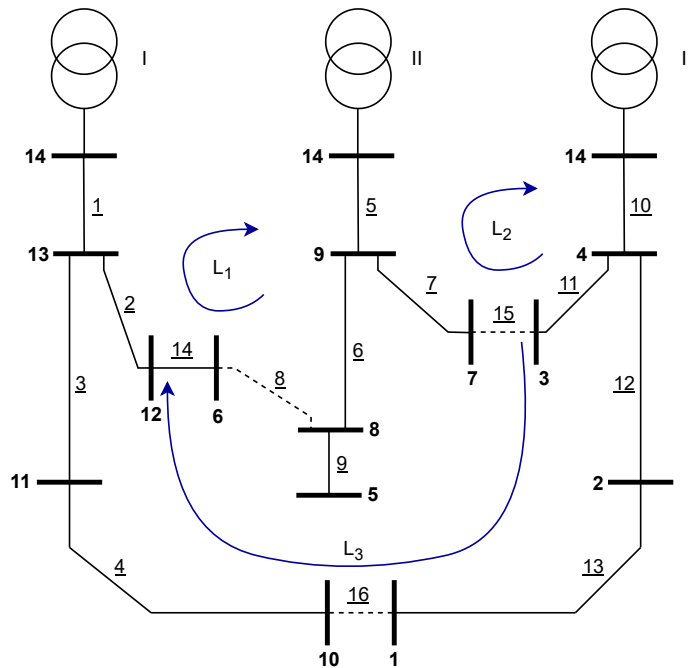
Figura 6 - Primeira iteração no primeiro laço.



Fonte: Elaborado pela autora.

Esta nova configuração com perdas de 676,6309 kW é armazenada. Fecha-se o ramo 2 e agora o ramo 8 é aberto, conforme mostra Figura 7.

Figura 7 - Segunda iteração no primeiro laço.



Fonte: Elaborado pela autora.

Esta nova configuração com perdas de 493,1542 kW é armazenada. Volta-se para a configuração inicial da Figura 5 com os ramos 14, 15 e 16 abertos. A busca local continua no laço L_2 fechando o ramo 15 e abrindo os ramos 7 e 11, um de cada vez. Da mesma forma com o laço L_3 fechando o ramo 16 e abrindo os ramos 4 e 13. São realizadas 6 trocas nesse sistema.

A escolha da melhor solução acontece apenas no final da busca local, após explorar toda a vizinhança e calcular as perdas de cada solução vizinha.

4.2 CONTROLE DA ÁRVORE DE BRANCH AND BOUND UTILIZANDO A PROPOSTA DE GLOVER & ZIONTS

O algoritmo desenvolvido utiliza uma estrutura *branch and bound*, cuja árvore de soluções é controlada através da proposta de enumeração implícita de Glover e Zionts (1965). Originalmente os conceitos da enumeração implícita de Glover e Zionts (1965) eram aplicados a problemas binários, cuja ideia é avaliar somente uma parte das soluções possíveis, descartando as restantes por não serem interessantes. É o que se pretende realizar com o controle da árvore de *branch and bound* binária para o problema de RSDEE.

4.2.1 Conceitos e definições

Os conceitos e definições utilizados para controlar a árvore de *branch and bound* são apresentados a seguir.

Notação

- $+j$ indica que a variável x_j é fixada em 1
- $-j$ indica que a variável x_j é fixada em 0

A variável binária x_j representa o status do ramo j , $x_j = 0$ para o estado aberto e $x_j = 1$ para o estado fechado. Um elemento sublinhado, como \underline{j} , indica que a variável x_j para alternativa $x_j = 0$ já foi analisada e sondada. De forma análoga com $-\underline{j}$ indica que a alternativa $x_j = 1$ já foi analisada e sondada.

Solução corrente

A informação da solução corrente armazenada é dinâmica, utiliza-se apenas um vetor para caracterizar a árvore de *branch and bound* em desenvolvimento. O vetor J_t representa a solução parcial corrente do subproblema t na árvore de *branch and bound*, na qual estão definidos os valores binários das variáveis que representam os ramos que já foram fixados. A cada iteração o vetor é modificado. Por exemplo:

$$J_t = \{1, -2, -\underline{7}, 9\} \quad (15)$$

Indicando que $x_1 = x_9 = 1$, $x_2 = 0$ e $x_7 = 0$ com a alternativa $x_7 = 1$ já sondada e as outras variáveis estão livres.

Variáveis livres

As variáveis livres são aquelas que não possuem valor binário atribuído por uma solução parcial e, portanto, encontram-se disponíveis para assumir um valor 0 – 1. A variável que não está contida em J_t , está livre. Entretanto, no problema de RSDEE, uma variável livre é considerada como fechada e assim, o ramo se encontra temporariamente fechado para realizar o processamento de cálculos.

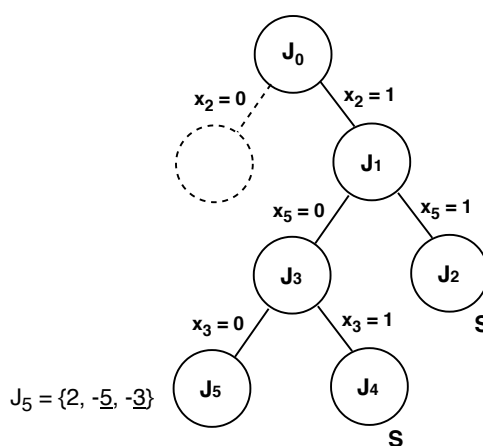
Perdas da solução corrente

Para cada solução corrente é determinada a sua função objetivo através do fluxo de carga, a qual fornece o valor de perdas da configuração corrente. As perdas de cada subproblema é também a sua limitante inferior.

4.2.2 Exemplo ilustrativo

A representação da árvore é feita de modo que para cada subproblema gerado é atribuído um valor para uma variável binária que caracteriza a abertura ou fechamento do ramo. Este processo é representado através da solução parcial corrente J_t . A forma como se dá a representação de uma árvore de soluções, baseada na proposta de Glover e Zionts (1965), é descrita a seguir.

Figura 8 - Árvore exemplo.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 8 ilustra a árvore em estrutura *branch and bound* de um problema genérico. A árvore inicia em J_0 , no qual não há valores de variáveis atribuídos. J_0 é ramificado através de uma variável binária. O novo subproblema J_1 não está vazio, pois possui valor atribuído para a variável x_2 . Conforme a árvore de soluções aumenta, são atribuídos valores aos novos J_t . Para a árvore exemplo, J_5 é considerado o subproblema corrente que está em análise. O vetor de solução J_5 representa a árvore de *branch and bound* mostrada na Figura 8 e as informações são dadas da seguinte forma:

- O primeiro elemento de J_5 é o 2. Este elemento indica que o subproblema com a variável x_2 foi analisado para o estado fechado, porém não foi analisado para o estado aberto ainda, portanto, não está sublinhado.
- O segundo elemento de J_5 é $\underline{-5}$. Este elemento indica que o subproblema com a variável x_5 já foi analisado e sondado para estado fechado e agora se encontra em estado aberto.
- O terceiro elemento de J_5 é $\underline{-3}$. Este elemento indica que o subproblema com a variável x_3 já foi analisado e sondado para estado fechado e agora se encontra em estado aberto.

O método de representação de um subproblema indica através de J_t o caminho da árvore de soluções e os subproblemas sondados e não sondados.

4.3 TESTES DE SONDAGEM

Os testes de sondagem são realizados com o objetivo de eliminar subproblemas de serem analisados e conseqüentemente eliminar seus descendentes que podem não ser atrativos. Um subproblema pode ser sondado quando a sua solução apresenta alguma das seguintes características:

Teste 1: Se a solução corrente for desconexa. Neste caso a solução corrente, com os ramos livres fechados, é desconexa e portanto é inactível, conseqüentemente seus descendentes também são inactíveis. Portanto o subproblema é sondado de modo a ser eliminado de futuras avaliações.

Teste 2: Se o limitante inferior do valor das perdas totais da solução corrente é igual ou pior à perda total da incumbente. Neste caso, a solução corrente parcial pode ter soluções radiais em sua região factível, mas essas propostas são de pior qualidade que a incumbente e, portanto, o subproblema é sondado e eliminado de futuras avaliações.

Assuma-se aqui que uma topologia fracamente malhada deve ter o valor de perdas menor que uma topologia radial. Isto na prática é quase sempre verdadeiro, no entanto, teoricamente, não é. Em alguns casos, ao alterar a topologia através da abertura de um ramo, as perdas podem diminuir. Dessa forma, os testes em alguns sistemas apresentados neste trabalho consideram uma tolerância para o limitante inferior dos subproblemas. As tolerâncias serão mencionadas quando utilizadas no Capítulo 5.

Teste 3: Se ao fixar um ramo em estado fechado, forma-se um laço no sistema. Neste caso, ao fixar um ramo em estado fechado definitivamente, a solução corrente apresenta formação de laço e portanto é inactível, conseqüentemente seus descendentes também são inactíveis. O subproblema é sondado de modo a ser eliminado de futuras avaliações.

Teste 4: Se o número de ramos fixados em estado aberto no sistema for igual ao número de laços independentes da configuração malhada. Neste caso, a configuração corrente apresenta o número máximo de ramos abertos, $nr - (nb - 1)$ onde nr é o número de ramos do sistema e nb o número de barras, que o sistema permite para ser radial. Portanto os ramos livres são definitivamente fixados em estado fechado, obtendo uma configuração radial. Verifica-se se a solução é melhor que a incumbente, caso seja, atualiza-se a incumbente e o subproblema é sondado. Caso contrário, apenas sonda-se o subproblema.

Teste 5: Se o número de ramos fixados em estado fechado no sistema for igual ao número de barras menos um ($nb - 1$). Neste caso a configuração apresenta o número máximo de ramos fechados que o sistema permite para ser radial. Portanto os ramos livres são definitivamente fixados em estado aberto, obtendo uma configuração radial. Verifica-se se

a solução é melhor que a incumbente, caso seja, atualiza-se a incumbente e o subproblema é sondado. Caso contrário, apenas sonda-se o subproblema.

4.4 ESCOLHA DO PRÓXIMO SUBPROBLEMA A SER RESOLVIDO

A estratégia utilizada para escolha do próximo subproblema a ser resolvido é denominada de LIFO (*Last in, First Out*). O critério LIFO estabelece que o próximo subproblema da árvore a ser analisado é o que foi gerado mais recentemente. Em diferentes passos se deve escolher o próximo subproblema a ser resolvido, através do critério LIFO.

Um destes passos é quando um subproblema é gerado. Neste caso há uma solução corrente, conforme exemplo J_6 da Equação (16).

$$J_6 = \{-1, -2, 5, 8, -7\} \quad (16)$$

O ramo escolhido para realizar a separação do subproblema em um subproblema mais restrito é o ramo 11. Portanto, J_6 gera a nova solução parcial J_7 com $x_{11} = 1$. Pela regra LIFO, o último subproblema criado será o primeiro a ser analisado, logo J_7 com $x_{11} = 1$ se torna a solução corrente J_7 , da seguinte forma.

$$J_7 = \{-1, -2, 5, 8, -7, 11\} \quad (17)$$

O subproblema J_t que contém o $x_{11} = 0$ está implicitamente em J_7 da Equação (17), pois não foi analisado ainda.

Outro momento em que se deve escolher o próximo subproblema a ser resolvido é quando um subproblema é sondado. Neste caso, se J_7 da Equação (17) for sondado, pela regra LIFO, o último subproblema criado não sondado ainda é justamente o subproblema implícito com o ramo $x_{11} = 0$. Desta forma, é gerado J_8 com $x_{11} = 0$ que se torna a solução corrente da seguinte forma.

$$J_8 = \{-1, -2, 5, 8, -7, -11\} \quad (18)$$

Finalmente, se J_8 da Equação (18) for sondado, é gerado J_9 que se torna a nova solução corrente da seguinte forma:

$$J_9 = \{-1, -2, 5, -8\} \quad (19)$$

Ou seja, são eliminados os subproblemas à direita de J_t já sondados, de forma a encontrar

o último subproblema gerado não sondado ainda para que seja analisado. O critério LIFO estabelece que o último subproblema criado não sondado ainda é o primeiro a ser analisado e a regra está implícita na solução corrente J_t através da representação de Glover e Zionts (1965).

4.5 ESCOLHA DA VARIÁVEL PARA SEPARAÇÃO

O critério de escolha da variável para realizar a ramificação de um subproblema em um novo subproblema é determinado analisando a solução corrente.

Dada a solução corrente J_t que será ramificada, é possível determinar o fluxo de carga em cada ramo da configuração e os ramos são ordenados em uma lista de ramos de trabalho corrente (LRTC) do maior para o menor fluxo. O critério de escolha da variável de separação consiste em escolher o ramo livre melhor classificado na LRTC, o que facilita a sondagem rápida dos subproblemas gerados através do Teste 2.

4.6 DETERMINAÇÃO DE LIMITANTE INFERIOR E SUPERIOR DE CADA SUBPROBLEMA

Através do fluxo de carga calcula-se o valor de perdas de cada configuração e esse valor é chamado de limitante inferior. O limitante superior é o valor de perdas da melhor solução encontrada até o momento, isto é, a incumbente.

4.7 ALGORITMO

O processo iterativo do algoritmo é descrito a seguir:

Passo 1: Montar os dados do problema. Utiliza-se o AHC de Merlin e Back (1975) para encontrar uma boa solução inicial, definida como limitante superior e primeira incumbente. Neste ponto, a solução encontrada pelo AHC é a solução corrente J_t . Ir ao passo 2.

Passo 2: Estratégia *backward* de subida na árvore de *branch and bound*:

a) Se $J_t = \emptyset$ parar o processo e a incumbente é a solução ótima para o sistema. Em caso contrário ir ao Passo 2.b).

b) Analisar o elemento mais à direita de J_t . Caso o elemento esteja sublinhado, eliminá-lo de J_t , adicioná-lo à LRTC e voltar ao Passo 2.a). Em caso contrário, fazer J_{t+1} complementando o elemento e, há duas situações:

- i. O ramo foi complementado com seu estado aberto. O subproblema com o ramo em estado fechado já foi analisado, é realizado seu complemento em estado aberto e o ramo é sublinhado. Fazer $J_{t+1} = J_t$. Atualizar a LRTC. Ir ao Passo 2(c).
- ii. O ramo foi complementado com seu estado fechado. Significa que este ramo pertence à solução do AHC. Neste caso, o subproblema com o ramo em estado aberto

já foi analisado, é realizado seu complemento em estado fechado e o ramo é sublinhado. Fazer $J_{t+1} = J_t$. Para J_t é resolvido um problema de FCFM e a LRTC é atualizada. Ir para Passo 3.

c) Para a solução corrente J_t , podem acontecer:

- i. Ao fixar o ramo em estado aberto, a configuração atende ao Teste 1. Neste caso a topologia é desconexa, portanto inactível, e é sondada. Voltar ao Passo 2.
- ii. Ao fixar o ramo em estado aberto, a configuração não atende ao Teste 1 e atende ao Teste 4. Neste caso o ramo ao ser fixado em estado aberto faz com que o número de ramos fixados em aberto seja igual a $nr - (nb - 1)$. Portanto, as variáveis livres da LRTC são fixadas definitivamente em estado fechado e é resolvido um problema de FCR. Neste ponto é analisado se a solução é melhor que a incumbente, caso seja, a incumbente é atualizada e J_t é sondado. Caso contrário, J_t é simplesmente sondado. Para ambos os casos, a próxima ação é voltar ao Passo 2.
- iii. Ao fixar o ramo em estado aberto, a configuração não atende ao Teste 1 e não atende ao Teste 4. Neste caso é resolvido um problema de FCFM para a solução corrente J_t e a LRTC é atualizada. Ir ao Passo 3.

Passo 3: Estratégia *forward* de descida da árvore de *branch and bound*:

- a) Verifica-se se a solução corrente J_t atende ao Teste 2, ou seja, se a função objetivo parcial (limitante inferior) de J_t é de igual ou de pior qualidade que a incumbente. Se sim, sondar e voltar ao Passo 2. Em caso contrário ir ao passo 3.b).
- b) Escolhe-se a variável x_j que corresponde ao ramo melhor classificado em LRTC para ramificar J_t em J_{t+1} com $x_j = 1$. Fazer $J_{t+1} = J_t$. O ramo x_j é retirado da LRTC e passa a compor o vetor de solução corrente. Podem acontecer os seguintes casos:
 - i. Ao fixar o ramo em estado fechado, a configuração atende ao Teste 3. Neste caso há formação de laço no sistema e J_t é sondado. Voltar ao Passo 2.
 - ii. Ao fixar o ramo em estado fechado, a configuração não atende ao Teste 3 e atende ao Teste 5. Neste caso o ramo ao ser fixado em estado fechado faz com que o número de ramos fixados em fechado seja igual a $nb - 1$. Portanto, as variáveis livres da LRTC são fixadas definitivamente em estado aberto e é resolvido problema de FCR. Neste ponto é analisado se a solução é melhor que a incumbente, caso seja, a incumbente é atualizada e J_t é sondado. Caso contrário, J_t é simplesmente sondado. Para ambos os casos, a próxima ação é voltar ao Passo 2.
 - iii. Ao fixar o ramo em estado fechado, a configuração não atende ao Teste 3 e não atende ao Teste 5. Não é necessário resolver um novo problema de fluxo de carga,

pois ao fixar um ramo em estado fechado, o valor de perdas não se altera. Neste caso o processo *forward* deve continuar. Voltar ao Passo 3.b).

4.8 ESTRATÉGIA HEURÍSTICA PARA REDUZIR O ESPAÇO DE BUSCA - ALGORITMO DE PRIM

Para que o processo do algoritmo seja acelerado, é proposta uma estratégia heurística utilizando o algoritmo de Prim para o problema de RSDEE descrito no Capítulo 3. O uso do algoritmo de Prim para o problema de RSDEE incorporado à metodologia proposta, acelera o processo de busca pois reduz o número de subproblemas a serem analisados.

O esquema de melhoria do algoritmo incorporando esta estratégia funciona da seguinte forma:

1. Obter uma topologia radial utilizando o AHC de Merlin e Back (1975) descrito anteriormente no Capítulo 2;
2. Melhoria local descrita em 4.1;
3. Fixar um determinado número de ramos definitivamente em estado fechado com o algoritmo de Prim para o problema de RSDEE descrito na Seção 3.2.
4. Algoritmo descrito na Seção 4.7.

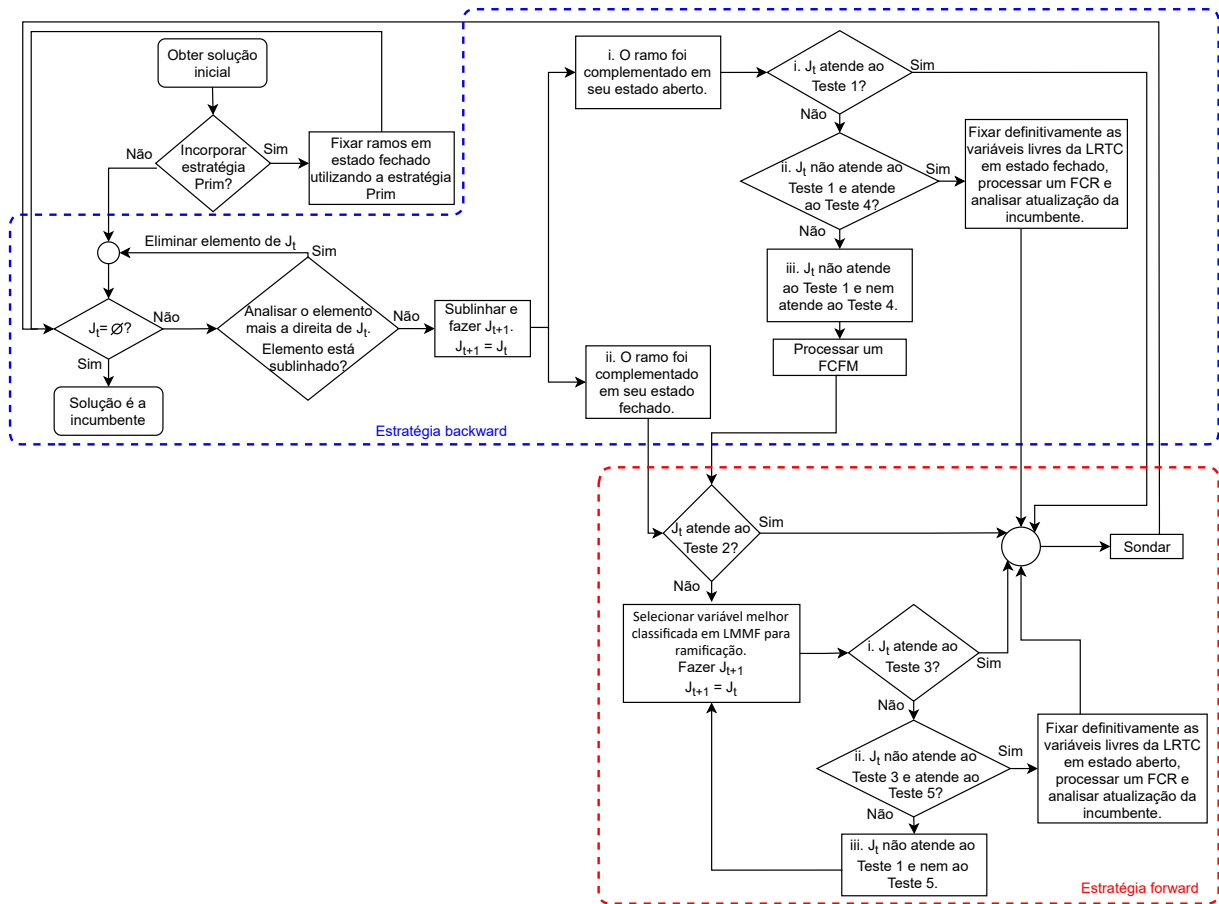
A estratégia é incorporada na metodologia após obter a solução inicial e antes de se iniciar a estratégia *branch and bound*.

No algoritmo de Prim, os ramos são ordenados do maior ao menor de fluxo de carga. Se espera que os ramos com maior fluxo de carga estejam fechados na solução ótima dos sistemas. Portanto, a ideia é já fixa-los em estado fechado antes de realizar a busca na árvore de *branch and bound*, fazendo com que o espaço de busca por uma boa solução seja reduzido.

4.9 FLUXOGRAMA

Para entender melhor o esquema da metodologia desenvolvida, os procedimentos são descritos, de uma forma geral, no fluxograma da Figura 9.

Figura 9 - Fluxograma.



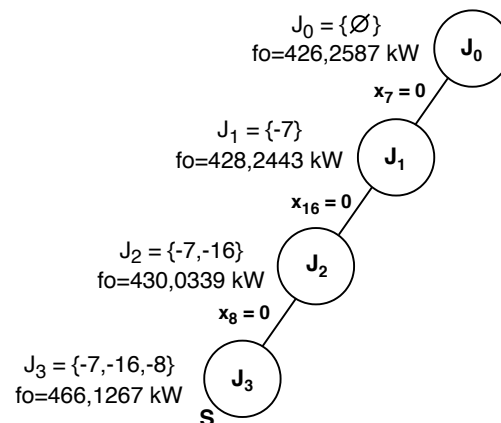
Fonte: Elaborado pela autora.

4.10 EXEMPLO ILUSTRATIVO

Como exemplo ilustrativo, aplica-se os algoritmos em estrutura *branch and bound* ao sistema de 14 barras de Civanlar et al. (1988) mostrado na Figura 1. O sistema possui 14 barras, sendo 13 barras de carga, uma de subestação e 16 circuitos (ramos). A tensão na subestação é de 23 kV, as demandas totais de potência ativa e reativa são de 28.700 kW e 5.900 kVAr, respectivamente. É considerada como tensão mínima 0,93 pu e tensão máxima de 1,05 pu.

Inicialmente o sistema de Civanlar et al. (1988) possui as chaves dos ramos 14, 15 e 16 abertas. O estado das chaves são todos alterados para fechados e se obtém a configuração malhada do sistema, no qual se aplica o AHC de Merlin e Back (1975) e, posteriormente, é realizada a melhoria local para encontrar uma boa solução inicial, definida como limitante superior e primeira incumbente. Na Figura 10 apresenta-se a representação da solução inicial por meio da árvore de *branch and bound*.

Figura 10 - Árvore de *branch and bound* da solução inicial para o sistema de 14 barras.

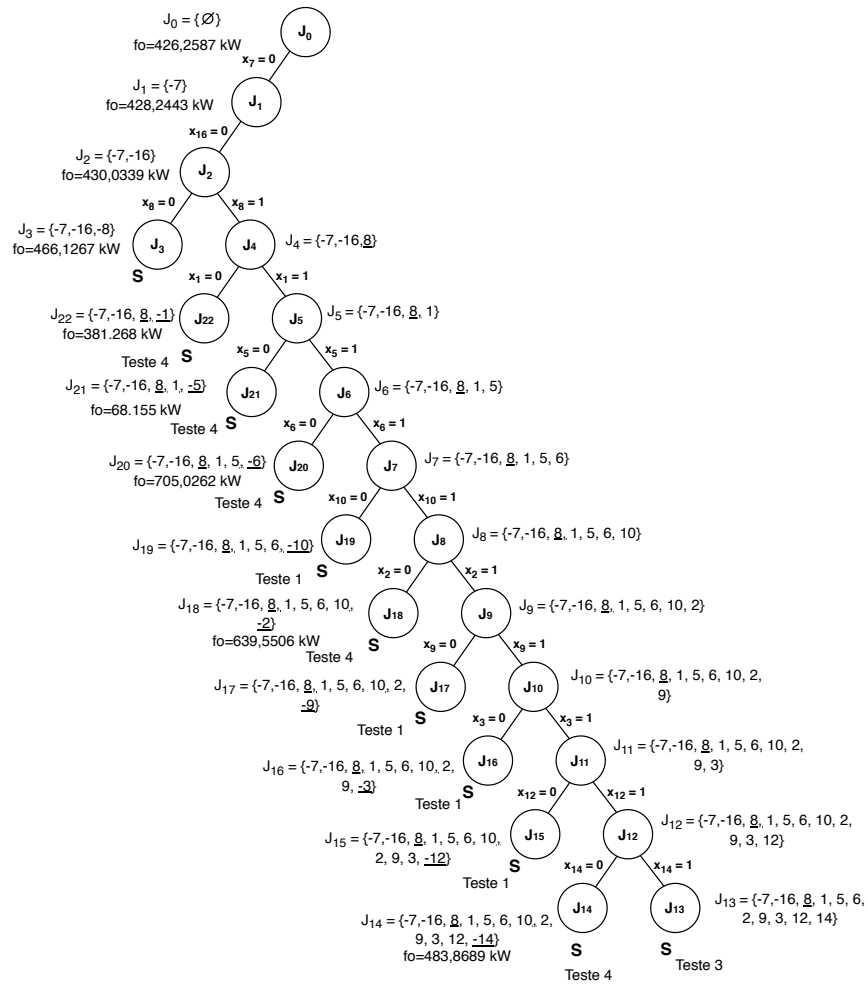


Fonte: Elaborado pela autora.

4.10.1 *Branch and Bound* básico

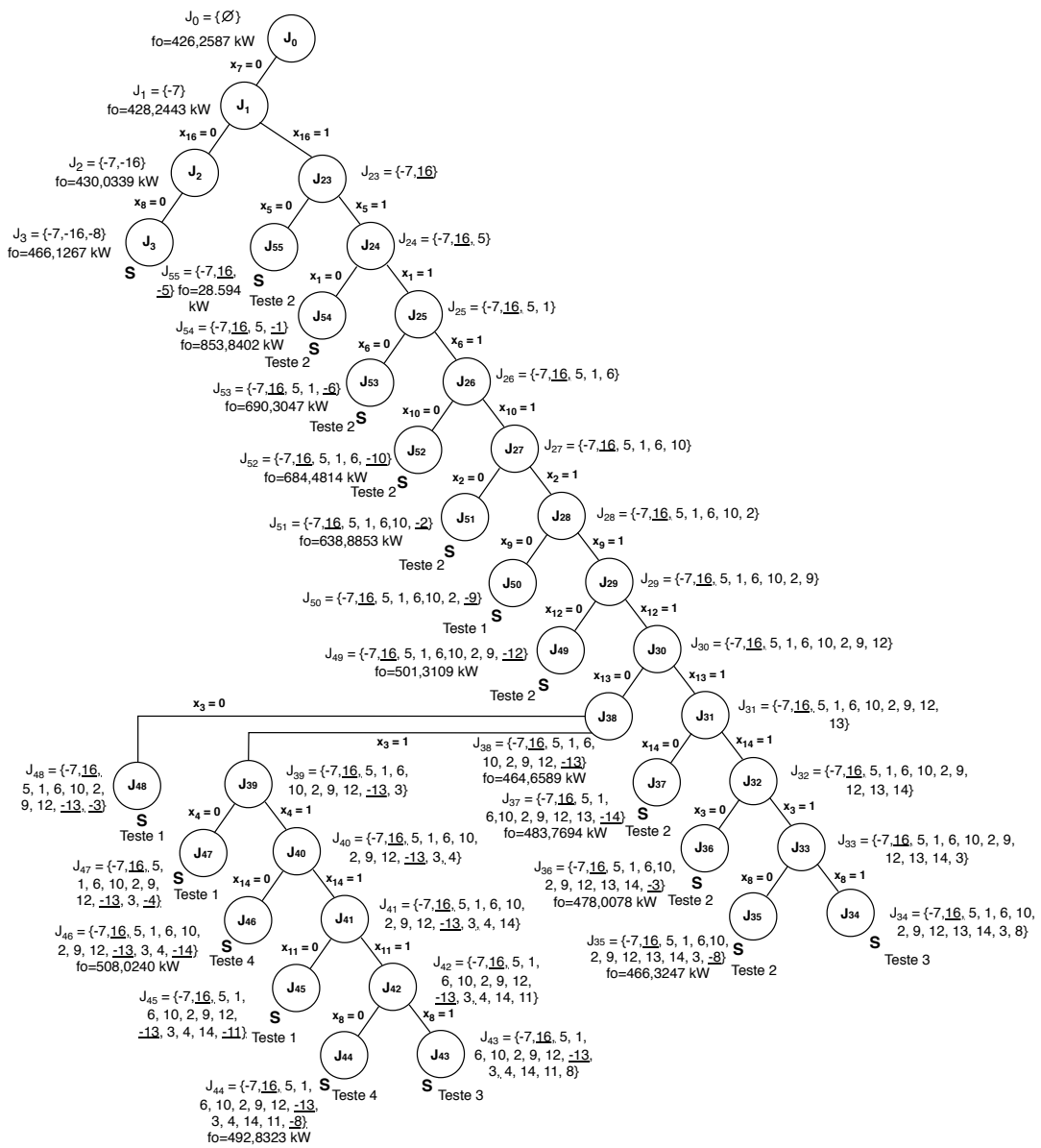
A partir da solução inicial obtida, inicia-se o algoritmo em estrutura *branch and bound* básico e o processo avança de forma a gerar e sondar todos os subproblemas e encontrar a melhor solução. As Figuras 11, 12 e 13 mostram a árvore de soluções para o sistema de 14 barras, dividida em três partes.

Figura 11 - Árvore de *branch and bound* para o sistema de 14 barras - Primeira parte.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 12 - Árvore de *branch and bound* para o sistema de 14 barras - Segunda parte.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 13 - Árvore de *branch and bound* para o sistema de 14 barras - Terceira parte.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Tabela 4 apresenta-se o estado inicial do sistema, a solução inicial obtida e o resultado encontrado utilizando o algoritmo em estrutura *branch and bound*. São apresentados também o número de problemas de FCFM e FCR processados.

Ao todo foram resolvidos 31 problemas de FCFM e 14 FCR, obtendo uma solução com perdas de 466,1267 kW, que representa uma redução de 8,86% em relação as perdas da configuração inicial, e tensão mínima nas barras de 0,9716 pu.

A Figura 14 mostra o perfil de tensão mínima no sistema, antes e depois da reconfiguração. Verifica-se uma melhoria no perfil de tensão do sistema com a reconfiguração. Por fim, a

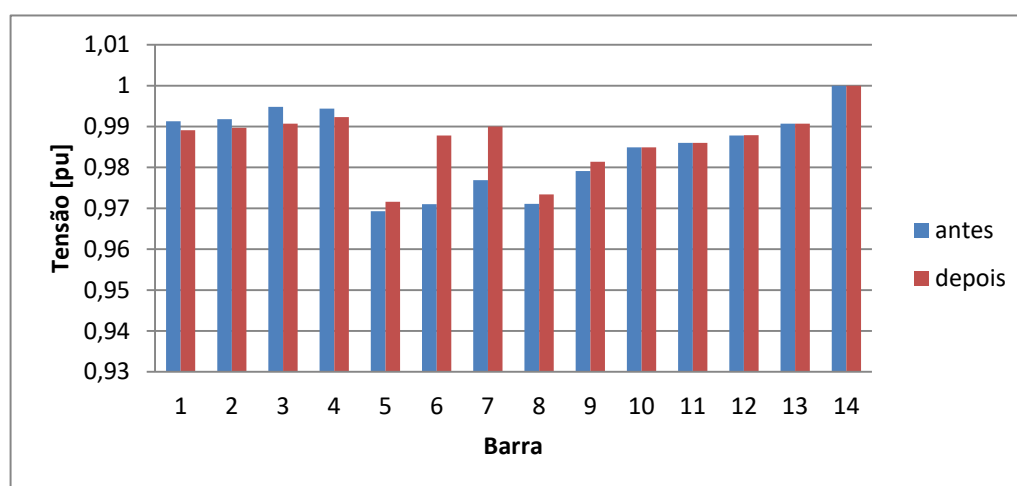
Tabela 4 - Resultados para o sistema de 14 barras.

Configuração	Circuitos abertos	Perdas [kW]	# de cálculos de fluxo de carga
Inicial	14, 15, 16	511,4356	-
Solução inicial	7, 8, 16	466,1267	3 FCFM + 7 FCR
Método proposto básico	7, 8, 16	466,1267	28 FCFM + 7 FCR

Fonte: Elaborado pela autora.

configuração inicial e a solução final obtida são factíveis em relação a restrição de nível de tensão no sistema.

Figura 14 - Perfis de tensão no sistema de 14 barras antes e depois da reconfiguração.



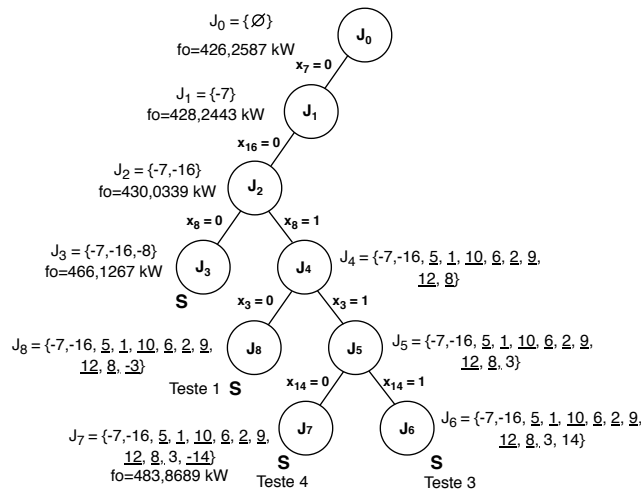
Fonte: Elaborado pela autora.

4.10.2 *Branch and Bound* utilizando Prim para acelerar o processo

A partir da solução inicial encontrada, utiliza-se o algoritmo de Prim para o problema de RSDEE fixando definitivamente ramos em estado fechado e, posteriormente, a metodologia em estrutura *branch and bound* é implementada.

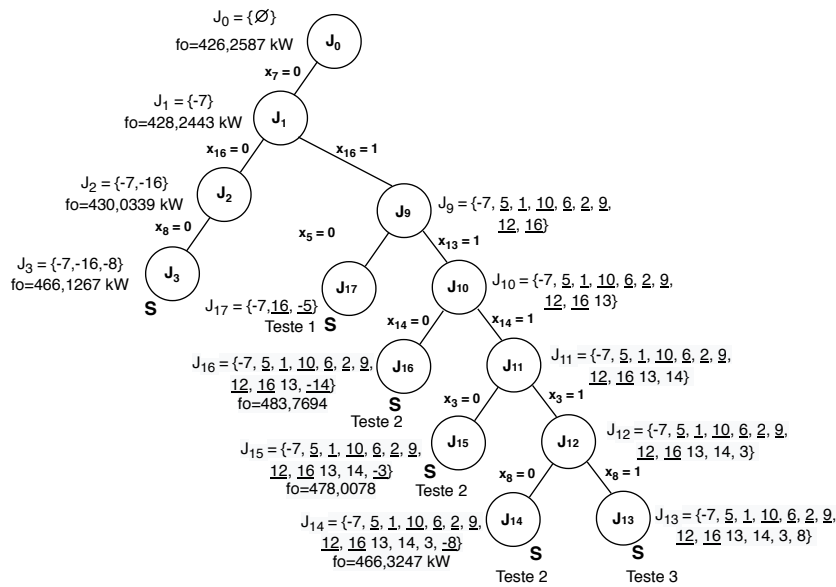
Nas Figuras 15, 16 e 17 apresentam-se as árvores de soluções para o sistema de 14 barras, divididas em três partes.

Figura 15 - Árvore de *branch and bound* com Prim para o sistema de 14 barras - Primeira parte.



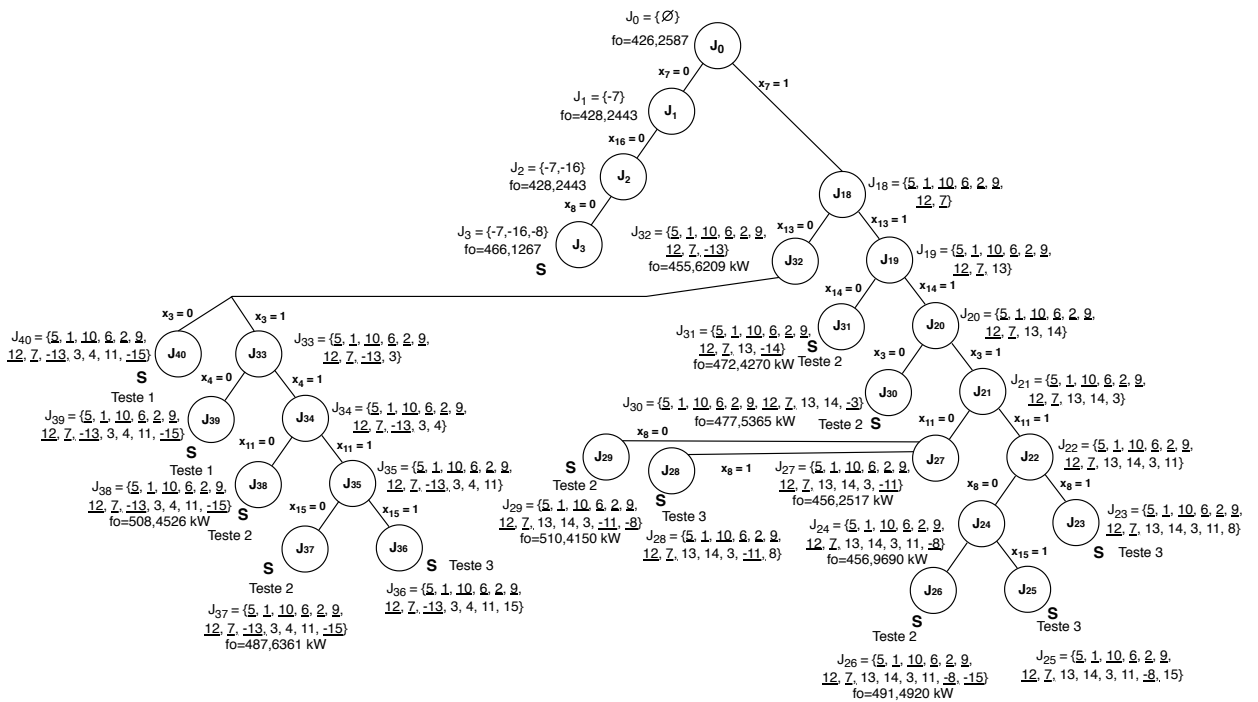
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 16 - Árvore de *branch and bound* com Prim para o sistema de 14 barras - Segunda parte.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 17 - Árvore de *branch and bound* com Prim para o sistema de 14 barras - Terceira parte.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 4 mostra o estado inicial do sistema, a solução inicial obtida e o resultado encontrado utilizando o algoritmo em estrutura *branch and bound*. São apresentados também o número de FCFM e FCR para cada resultado.

Tabela 5 - Resultados para o sistema de 14 barras.

Configuração	Circuitos fixados em estado fechado	Circuitos abertos	Perdas [kW]	# de cálculos de fluxo de carga
Inicial	-	14, 15, 16	511,4356	-
Solução inicial	-	7, 8, 16	466,1267	3 FCFM + 7 FCR
Método proposto com Prim	1, 2, 5, 6, 9, 10, 12	7, 8, 16	466,1267	17 FCFM + 1 FCR

Fonte: Elaborado pela autora.

Para este sistema, o número de ramos definitivamente fixados em estado fechado foram 7, que são os ramos 5, 1, 10, 6, 2, 9 e 12. Ao todo foram resolvidos 20 problemas de FCFM e 8 FCR, obtendo a solução ótima do sistema da mesma forma que a metodologia sem o uso do algoritmo de Prim, porém com uma busca na árvore de soluções reduzida.

5 TESTES E RESULTADOS

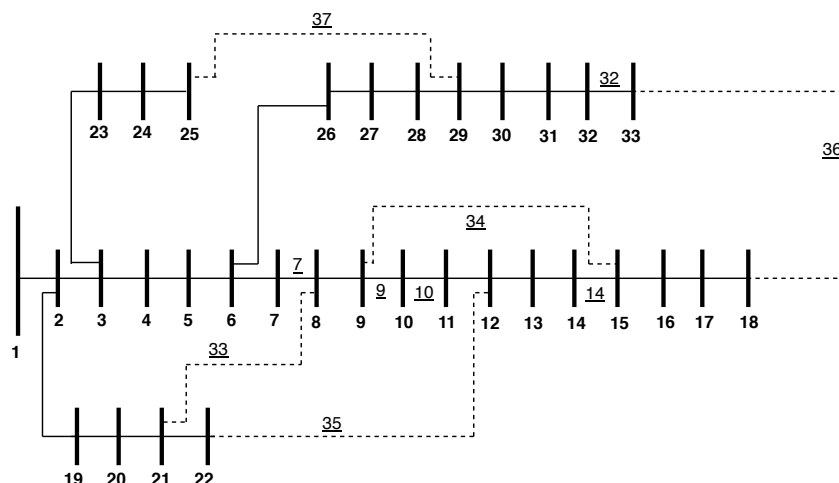
Os algoritmos em estrutura *branch and bound* propostos para resolver o problema de RS-DEE, foram implementados em linguagem de programação MATLAB[®] versão R2017a e os testes foram executados em um computador DELL com processador Intel[®] Core[™]i7-8700 de 3.20 GHz e 16.0 GB de memória RAM. A robustez dos algoritmos foi avaliada a partir de testes realizados em quatro sistemas de distribuição radiais, o sistema de 33 barras apresentado em Baran e Wu (1989), o de 69 barras apresentado em Chiang e Jean-Jumeau (1990b), o de 84 barras apresentado em Chiou et al. (2005) e o sistema de 136 barras apresentado em Mantovani et al. (2000). É considerada como tensão mínima 0,93 pu e tensão máxima de 1,05 pu para os sistemas.

5.1 SISTEMA DE 33 BARRAS

O sistema de 33 barras utilizado é apresentado por Baran e Wu (1989). Ele possui 33 barras, sendo 32 barras de carga, 1 barra de subestação e 37 circuitos (ramos). A tensão na subestação é de 12,66 kV, as demandas totais de potências ativa e reativa são respectivamente 3.715 kW e 2.300 kVAR. A tensão mínima no sistema antes da reconfiguração é de 0,9131 pu.

Na Figura 18 ilustra-se o sistema de 33 barras, na qual as chaves 33, 34, 35, 36 e 37 encontram-se abertas e são ilustradas pelas linhas tracejadas. Os dados completos deste sistema são apresentados no Anexo A.

Figura 18 - Sistema de 33 barras.



Fonte: Baran e Wu (1989).

Na Tabela 6 apresenta-se o estado inicial do sistema, a solução inicial obtida, o resultado obtido através do algoritmo em estrutura *branch and bound* básico e também o resultado com o algoritmo em estrutura *branch and bound* com o algoritmo de Prim. Os circuitos dos ramos definitivamente fixados em estado fechado na versão com o algoritmo de Prim são apresentados. São apresentados também o número de execuções de FCFM e FCR para cada um dos processos descritos.

Tabela 6 - Resultados para o sistema de 33 barras.

Configuração	Circuitos fixados em estado fechado	Circuitos abertos	Perdas [kW]	# de cálculos de fluxo de carga
Inicial	-	33, 34, 35, 36, 37	202,6771	-
Solução inicial	-	7, 9, 14, 32, 37	139,5513	5 FCFM + 11 FCR
Método proposto básico	-	7, 9, 14, 32, 37	139,5513	696 FCFM + 7 FCR
Método proposto com Prim	1, 2, 3, 4, 5, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 26	7, 9, 14, 32, 37	139,5513	145 FCFM + 7 FCR

Fonte: Elaborado pela autora.

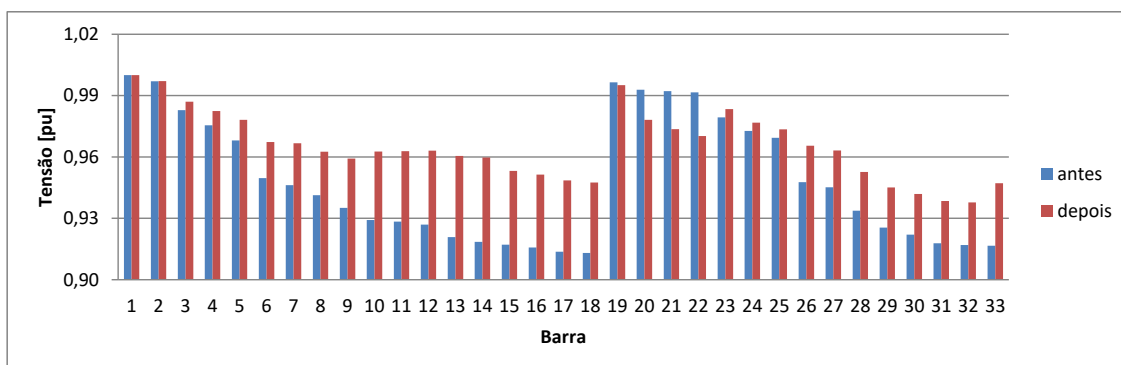
Para obter a solução inicial, foram processados 5 FCFM e 11 FCR, obtendo-se uma solução com perdas de 139,5513 kW.

O algoritmo em estrutura *branch and bound* básico obtém a solução com perdas de 139,5513 kW. A tensão mínima no sistema para solução final é de 0,9378 pu. O número de problemas de FCFM total para a metodologia básica é de 701 e FCR total de 18.

No algoritmo em estrutura *branch and bound* com o algoritmo de Prim, foram fixados 13 ramos definitivamente em estado fechado para reduzir o espaço de busca. A metodologia também obtém a solução com perdas de 139,5513 kW. O número de problemas de FCFM total para a metodologia com o algoritmo de Prim é de 150 e FCR total de 18.

Na Figura 19 apresenta-se os perfis de tensão no sistema de 33 barras antes e depois da reconfiguração.

Figura 19 - Perfis de tensão no sistema de 33 barras antes e depois da reconfiguração.



Fonte: Elaborado pela autora.

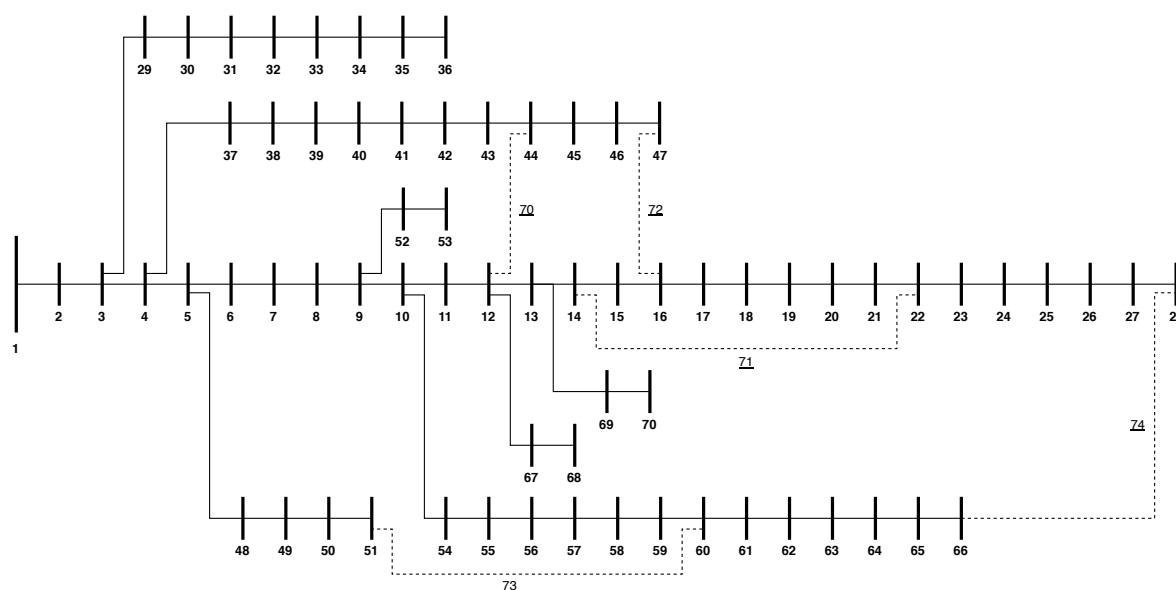
A partir da Figura 19 verifica-se que houve melhoria no perfil de tensão do sistema, que deixou de violar o limite mínimo de tensão.

5.2 SISTEMA DE 69 BARRAS

O sistema de 69 barras utilizado é apresentado por Chiang e Jean-Jumeau (1990b). Ele possui 69 barras, sendo 68 barras de carga, 1 barra de subestação e 74 circuitos (ramos). A tensão na subestação é de 12,66 kV, as demandas totais de potências ativa e reativa são respectivamente 1.107,91 kW e 897,93 kVAr. A tensão mínima no sistema antes da reconfiguração é de 0,9720 pu.

Na Figura 20 ilustra-se o sistema de 69 barras, na qual as chaves 70, 71, 72, 73 e 74 encontram-se abertas e são ilustradas pelas linhas tracejadas. Os dados completos deste sistema são apresentados no Anexo A.

Figura 20 - Sistema de 69 barras.



Fonte: Chiang e Jean-Jumeau (1990b)

Na Tabela 7 apresenta-se o estado inicial do sistema, a solução inicial obtida, o resultado obtido através do algoritmo em estrutura *branch and bound* básico e também o resultado com o algoritmo em estrutura *branch and bound* com o algoritmo de Prim. Os circuitos dos ramos definitivamente fixados em estado fechado na versão com o algoritmo de Prim são apresentados. São apontados também o número de execuções de FCFM e FCR para cada um dos processos descritos.

Tabela 7 - Resultados para o sistema de 69 barras.

Configuração	Circuitos fixados em estado fechado	Circuitos abertos	Perdas [kW]	# de cálculos de fluxo de carga
Inicial	-	70, 71, 72, 73, 74	20,9752	-
Solução inicial	-	11, 14, 59, 62, 71	9,9541	5 FCFM + 11 FCR
Método proposto básico	-	15, 59, 62, 70, 71	9,4279	1.278 FCFM + 96 FCR
Método proposto com Prim	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 8, 9, 10, 11, 12 13, 16, 17, 36, 37 38, 39, 40, 41, 42 43, 44, 45, 46, 47 48, 49, 50, 53, 54 55, 56, 57, 58, 60 61, 72, 73	15, 59, 62, 70, 71	9,4279	89 FCFM + 24 FCR

Fonte: Elaborado pela autora.

Para obter a solução inicial, foram processados 5 FCFM e 11 FCR, obtendo-se uma solução

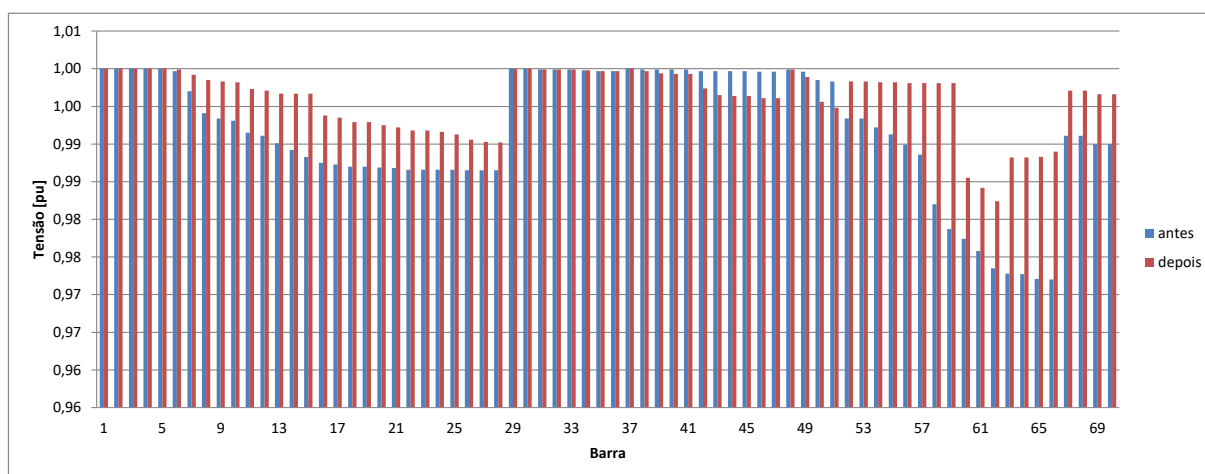
com perdas de 9,9541 kW.

O algoritmo em estrutura *branch and bound* básico obtém a solução com perdas de 9,4279 kW. A tensão mínima no sistema para solução final é de 0,9824 pu. O número de problemas de FCFM total para a metodologia básica é de 1.283 e FCR total de 107. Utilizou-se uma tolerância mínima para as funções objetivo parciais de 0,91% ao realizar o Teste 2 nesta metodologia.

No algoritmo em estrutura *branch and bound* com o algoritmo de Prim, foram fixados 40 ramos definitivamente em estado fechado para reduzir o espaço de busca. A metodologia também obtém a solução com perdas de 9,4279 kW. O número de problemas de FCFM total para a metodologia com o algoritmo de Prim é de 94 e FCR total de 35.

Na Figura 21 apresenta-se os perfis de tensão no sistema de 69 barras antes e depois da reconfiguração.

Figura 21 - Perfis de tensão no sistema de 69 barras antes e depois da reconfiguração.



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir da Figura 21 verifica-se que houve melhoria no perfil de tensão do sistema.

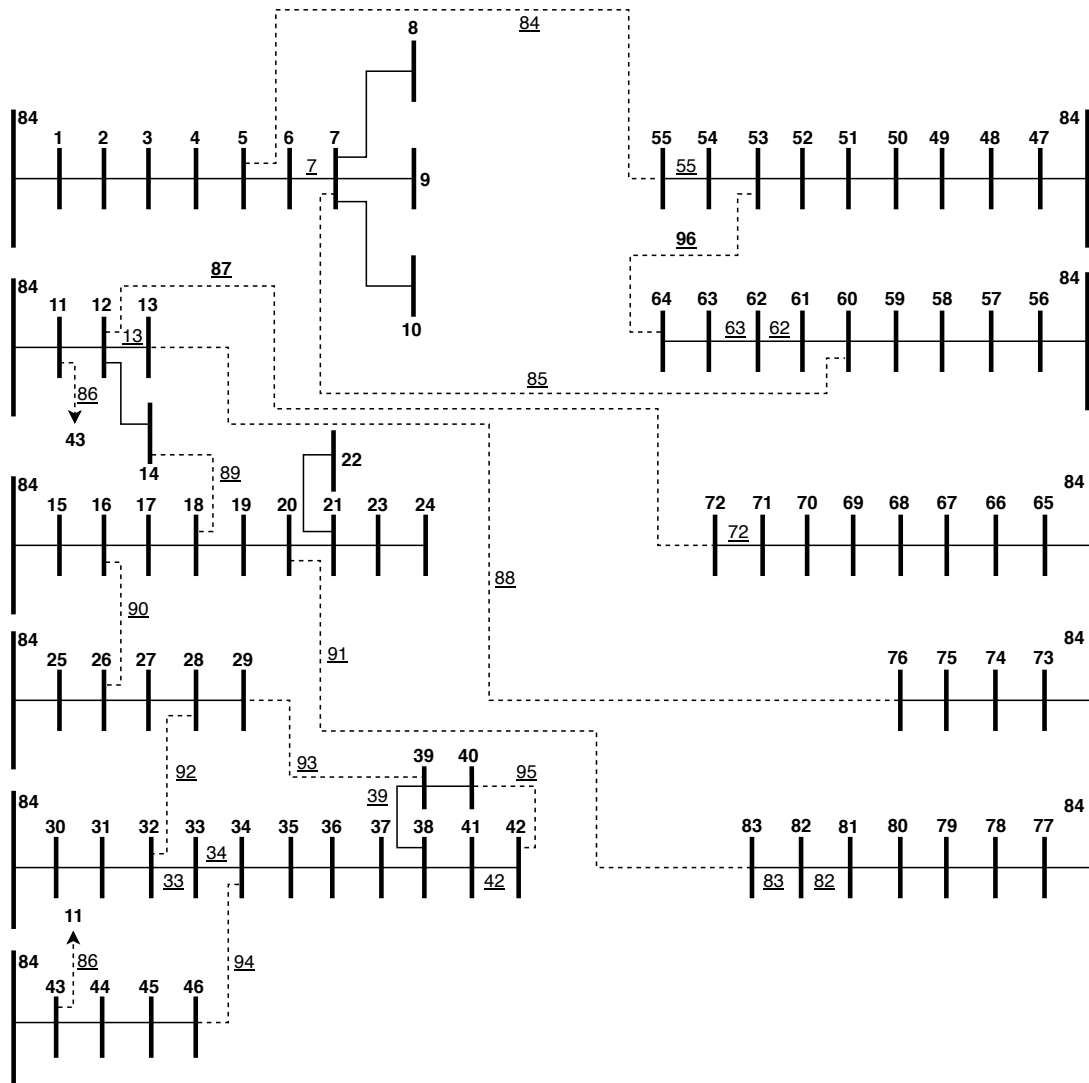
5.3 SISTEMA DE 84 BARRAS

O sistema de 84 barras utilizado é apresentado por Chiou et al. (2005). Ele possui 84 barras, sendo 83 barras de carga, 1 barra de subestação e 96 circuitos (ramos). A tensão na subestação é de 11,40 kV, as demandas totais de potências ativa e reativa são respectivamente 28.351 kW e 20.700 kVAr. A tensão mínima no sistema antes da reconfiguração é de 0,9285 pu.

Na Figura 22 ilustra-se o sistema de 84 barras, na qual as chaves 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95 e 96 encontram-se abertas e são ilustradas pelas linhas tracejadas. Os dados

completos deste sistema são apresentados no Anexo A.

Figura 22 - Sistema de 84 barras.



Fonte: Chiou et al. (2005).

Na Tabela 8 apresenta-se o estado inicial do sistema, a solução inicial obtida, o resultado obtido através do algoritmo em estrutura *branch and bound* básico e também o resultado com o algoritmo em estrutura *branch and bound* com o algoritmo de Prim. Os circuitos dos ramos definitivamente fixados em estado fechado na versão com o algoritmo de Prim são apresentados. São apontados também o número de execuções de FCFM e FCR para cada um dos processos descritos.

Para obter a solução inicial, foram processados 13 FCFM e 27 FCR, obtendo-se uma solução com perdas de 470,9250 kW.

O algoritmo em estrutura *branch and bound* básico obtém a solução com perdas de 469,8799 kW. A tensão mínima no sistema para solução final é de 0,9532 pu. O número de problemas de

Tabela 8 - Resultados para o sistema de 84 barras.

Configuração	Circuitos fixados em estado fechado	Circuitos abertos	Perdas [kW]	# de cálculos de fluxo de carga
Inicial	-	84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96	531,9975	-
Solução inicial	-	7, 34, 39, 42, 63, 72, 82, 84, 86, 88, 89, 90, 92	470,9250	13 FCFM + 27 FCR
Método proposto básico	-	7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90, 92	469,8799	1.949 FCFM + 95 FCR
Método proposto com Prim	1, 2, 3, 4, 5, 6, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 25, 26, 27, 28, 30, 31, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 56, 57, 58, 59, 60, 65, 66, 67, 68, 69, 73, 74, 75, 77, 78, 79, 94	7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90, 92	469,8799	1.588 FCFM + 88 FCR

Fonte: Elaborado pela autora.

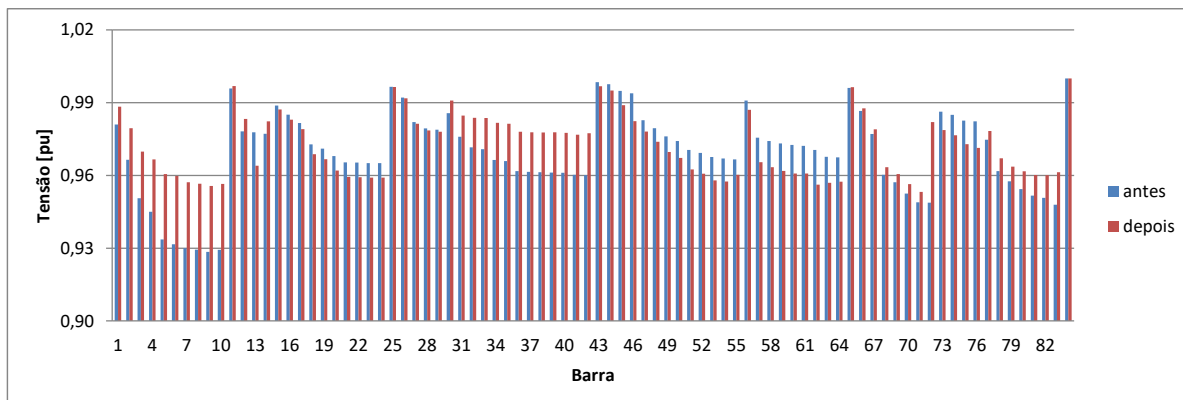
FCFM total para a metodologia básica é de 1.962 e FCR total de 122.

No algoritmo em estrutura *branch and bound* com o algoritmo de Prim, foram fixados 48 ramos definitivamente em estado fechado para reduzir o espaço de busca. A metodologia também obtém a solução com perdas de 469,8799 kW. O número de problemas de FCFM total para a metodologia com o algoritmo de Prim é de 1.601 e FCR total de 115.

Em ambos algoritmos utilizou-se uma tolerância mínima para as funções objetivo parciais de 0,29% ao realizar o Teste 2 do método.

Na Figura 23 apresenta-se os perfis de tensão no sistema de 84 barras antes e depois da reconfiguração.

Figura 23 - Perfis de tensão no sistema de 84 barras antes e depois da reconfiguração.



Fonte: Elaborado pela autora.

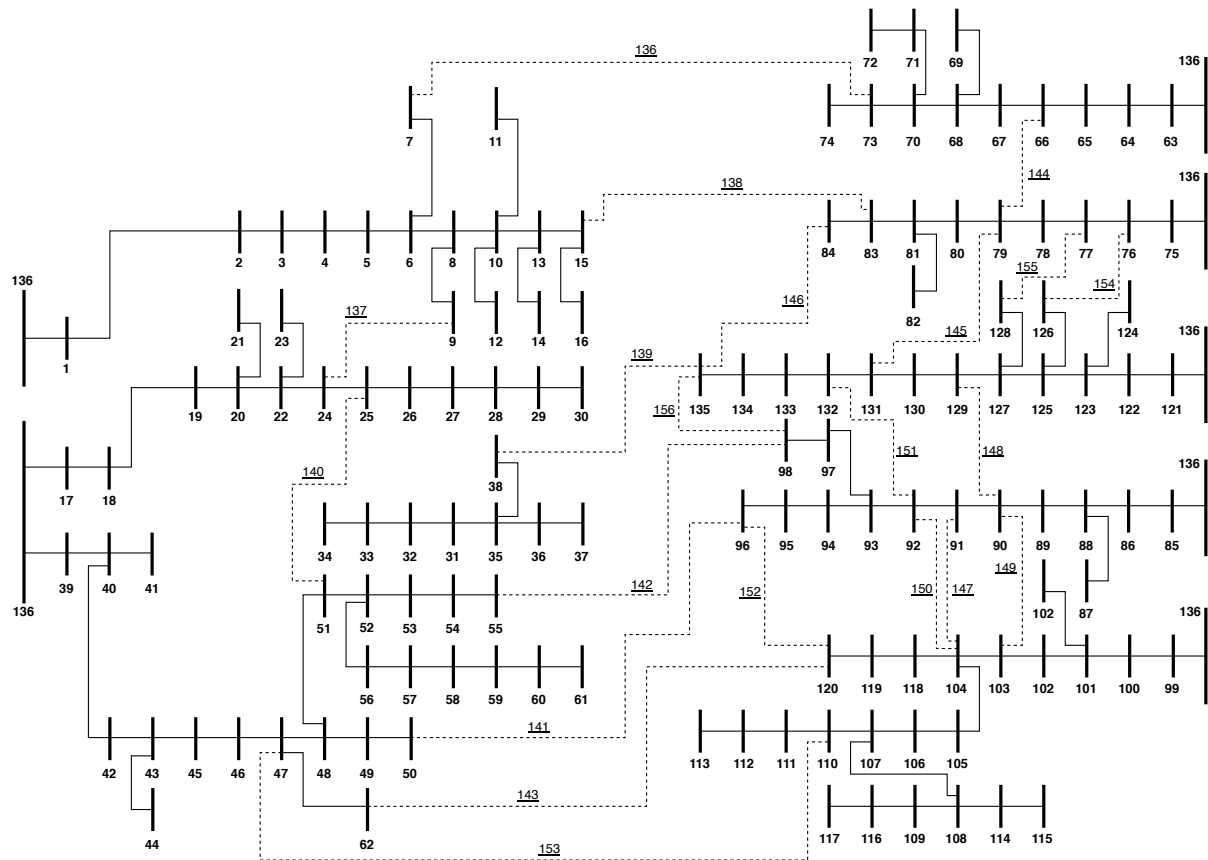
A partir da Figura 23 verifica-se que houve melhoria no perfil de tensão do sistema, que deixou de violar o limite mínimo de tensão.

5.4 SISTEMA DE 136 BARRAS

O sistema de 136 barras utilizado é apresentado por Mantovani et al. (2000). Ele possui 136 barras, sendo 135 barras de carga, 1 barra de subestação e 156 circuitos (ramos). A tensão na subestação é de 13,80 kV, as demandas totais de potências ativa e reativa são respectivamente 18.313,81 kW e 7.932,53 kVAr. A tensão mínima no sistema antes da reconfiguração é de 0,9307 pu.

Na Figura 24 ilustra-se o sistema de 136 barras, na qual as chaves 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155 e 156 encontram-se abertas e são ilustradas pelas linhas tracejadas. Os dados completos deste sistema são apresentados no Anexo A.

Figura 24 - Sistema de 136 barras.



Fonte: Mantovani et al. (2000)

Na Tabela 9 apresenta-se o estado inicial do sistema, a solução inicial obtida, o resultado obtido através do algoritmo em estrutura *branch and bound* básico e também o resultado com o algoritmo em estrutura *branch and bound* com o algoritmo de Prim. Os circuitos dos ramos definitivamente fixados em estado fechado na versão com o algoritmo de Prim são apresentados. São apontados também o número de execuções de FCFM e FCR para cada um dos processos descritos.

Para obter a solução inicial, foram processados 21 FCFM e 43 FCR, obtendo-se uma solução com perdas de 289,0847 kW.

O algoritmo em estrutura *branch and bound* básico obtém a solução com perdas de 280,1930 kW. A tensão mínima no sistema para solução final é de 0,9589 pu. O número de problemas de FCFM total para a metodologia básica é de 73.471.745 e FCR total de 81.

No algoritmo em estrutura *branch and bound* com o algoritmo de Prim, foram fixados 50 ramos definitivamente em estado fechado para reduzir o espaço de busca. A metodologia também obtém a solução com perdas de 280,1930 kW. O número de problemas de FCFM total

Tabela 9 - Resultados para o sistema de 136 barras.

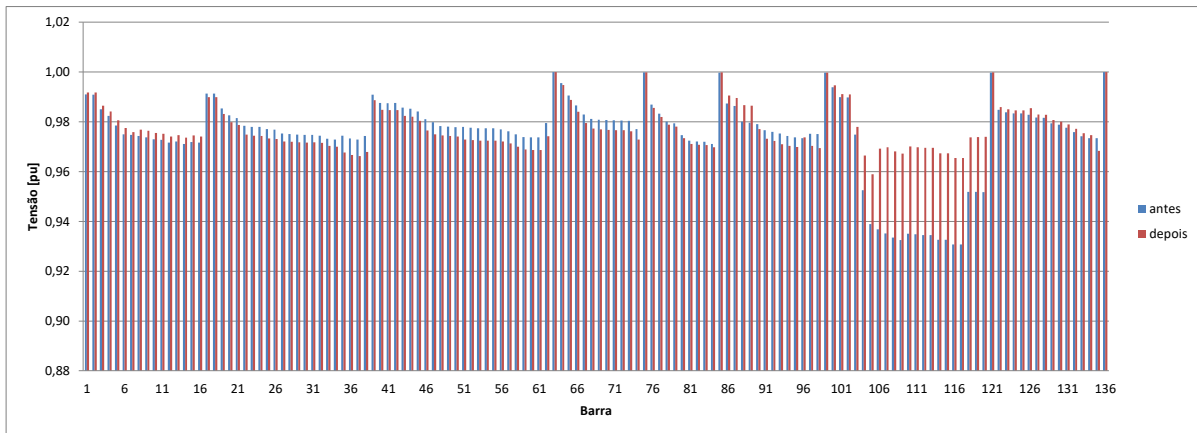
Configuração	Circuitos fixados em estado fechado	Circuitos abertos	Perdas [kW]	# de cálculos de fluxo de carga
Inicial	-	136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156	320,3644	-
Solução inicial	-	9, 38, 50, 54, 51, 90, 92, 96, 104, 106, 126, 135, 136, 138, 143, 144, 145, 146, 148, 150, 155	289,0847	21 FCFM + 43 FCR
Método básico	-	7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	280,1930	73.471.724 FCFM + 38 FCR
Método com Prim	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 17, 18, 19, 20, 22, 24, 25, 26, 39, 40, 42, 43, 45, 46, 47, 63, 64, 65, 66, 75, 76, 77, 78, 79, 85, 86, 88, 99, 100, 101, 103, 121, 122, 123, 125, 127, 129, 130, 131, 132, 149, 153	7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	280,1930	24.717.390 FCFM + 26 FCR

Fonte: Elaborado pela autora.

para a metodologia com o algoritmo de Prim é de 24.717.411 e FCR total de 69.

Na Figura 25 apresenta-se os perfis de tensão no sistema de 136 barras antes e depois da reconfiguração.

Figura 25 - Perfis de tensão no sistema de 136 barras antes e depois da reconfiguração.



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir da Figura 25 verifica-se que houve melhoria no perfil de tensão do sistema.

5.5 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Os resultados obtidos com as metodologias são comparados com os melhores disponíveis na literatura especializada. A Tabelas 10 mostra as comparações de resultados para os sistemas analisados.

Tabela 10 - Comparação de resultados quanto às perdas.

Sistema	Algoritmos em estrutura <i>branch and bound</i> [kW]	(FRANCO et. al., 2012) [kW]	(SILVEIRA, 2020) [kW]
33 barras	139,5513	139,5513	139,5513
69 barras	9,4279	-	9,4279
84 barras	469,8799	469,8799	-
136 barras	280,1930	280,1930	280,1930

Fonte: Elaborado pela autora.

Para comparação de resultados dos sistemas foram utilizados os trabalhos de Franco et al. (2012) e Silveira (2020). No trabalho de Franco et al. (2012) a metodologia utilizada para resolução é um algoritmo de Busca Tabu. São comparados os resultados dos sistemas de 33, 84 e 136 barras em relação às perdas da topologia final. O trabalho de Silveira (2020) é utilizado para comparação de resultados dos sistema de 33, 69 e 136 barras. O autor apresenta diversos modelos matemáticos em seu trabalho e os resultados aqui utilizados se referem ao modelo de PLIM empregado pelo autor.

Na Tabela 10 são apresentadas as soluções obtidas com os algoritmos em estrutura *branch and bound* proposto neste trabalho e as soluções dos dois trabalhos utilizados para comparação. A partir das informações da tabela, pode-se concluir que o desempenho dos algoritmos em estrutura *branch and bound* são eficientes pois obtêm as melhores soluções conhecidas na literatura especializada.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram desenvolvidos algoritmos em estrutura *branch and bound* para resolver de forma eficiente o problema de RSDEE considerando a minimização de perdas de energia nos sistemas. Foram descritas as etapas dos algoritmos de *branch and bound*, a utilização de um AHC e melhoria local para obter a solução inicial e a estratégia utilizada para reduzir o espaço de busca com o algoritmo de Prim.

Dois algoritmos em estrutura *branch and bound* são desenvolvidos. O primeiro chamado de *branch and bound* básico, consiste em obter a solução inicial através do AHC com melhoria local e posteriormente é realizada a busca da solução final na árvore de soluções binária. O segundo algoritmo utiliza do mesmo conceito, porém com algoritmo de Prim incorporado na metodologia para reduzir o espaço de busca e obter a solução final. São realizados testes em sistemas de distribuição utilizando os dois algoritmos. Observa-se que o algoritmo que possui a estratégia com o algoritmo de Prim tem realmente seu espaço de busca reduzido.

Os algoritmos possuem a vantagem de terem uma simples implementação computacional. Porém, devido ao tamanho das árvores de soluções, o número de problemas de fluxo de carga que devem ser resolvidos é maior que na maioria das meta-heurísticas existentes na literatura especializada. Verifica-se também que para os sistemas testados de pequeno porte, a solução inicial gerada com o AHC e a melhoria local já são satisfatórios, obtendo pouca ou nenhuma diferença das soluções obtidas com o algoritmo em estrutura *branch and bound*.

Conclui-se que as duas versões do algoritmo em estrutura *branch and bound* para resolução do problema de RSDEE apresentaram um desempenho satisfatório nos testes realizados. As implementações dos algoritmos apresentaram os melhores resultados encontrados na literatura, permitindo reduzir as perdas e melhorar os níveis de tensão dos sistemas.

A proposta deste trabalho pode ser estendida para considerar outros aspectos. Sugestões para trabalhos futuros incluem:

- Considerar novos testes de sondagem;
- Estender a metodologia a todos os sistemas testes utilizados, considerando vários níveis de demanda;
- Inserir na metodologia a análise de curto-circuito e proteção dos sistemas.

REFERÊNCIAS

- ABABEI, C.; KAVASSERI, R. Efficient network reconfiguration using minimum cost maximum flow-based branch exchanges and random walks-based loss estimations. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 26, n. 1, p. 30–37, 2011.
- BARAN, M. E.; WU, F. F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 4, n. 2, p. 1401–1407, 1989.
- CABEZAS, A. M. G. **Novas formulações para o problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2007.
- CARRENO, E. M.; ROMERO, R.; PADILHA-FELTRIN, A. An efficient codification to solve distribution network reconfiguration for loss reduction problem. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 23, n. 4, p. 1542–1551, 2008.
- CHIANG, H.; JEAN-JUMEAU, R. Optimal network reconfigurations in distribution systems. ii. solution algorithms and numerical results. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 5, n. 3, p. 1568–1574, 1990b.
- CHIOU, J. P.; CHANG, C. F.; SU, C. T. Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 20, n. 2, p. 668–674, 2005.
- CIVANLAR, S.; GRAINGER, J. J.; YIN, H.; LEE, S. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 3, n. 3, p. 1217–1223, 1988.
- CORMEN, T. H.; LEISERSON, E. C.; RIVEST, R. L.; STEIN, C. **Algoritmos: teoria e prática**. 3. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2012.
- FRANCO, J.; LAVORATO, M.; RIDER, M. J.; ROMERO, R. An efficient implementation of tabu search in feeder reconfiguration of distribution systems. **IEEE Power and Energy Society General Meeting**, San Diego, p. 1–8, 2012.
- FREITAS, K. B.; ARANTES, M. S.; TOLEDO, C. F.; DELBEM, A. C. Miqp model and improvement heuristic for power loss minimization in distribution system with network reconfiguration. **Journal of Heuristics**, São Paulo, 2019.
- GLAMOCANIN, V. Optimal loss reduction of distributed networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, Atlanta, v. 5, n. 3, p. 774–782, 1990.
- GLOVER, F.; ZIONTS, S. A note on the additive algorithm of balas. **Operations Research**, v. 13, n. 4, p. 546–549, 1965.

- GOMES, F. V.; CARNEIRO, S.; PEREIRA, J. L. R.; VINAGRE, M. P.; GARCIA, P. A. N.; ARAUJO, L. R. A new heuristic reconfiguration algorithm for large distribution systems. **IEEE Transactions on Power systems**, New York, v. 20, n. 3, p. 1373–1378, 2005.
- GOSWAMI, S. K.; BASU, S. K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 7, n. 3, p. 1484–1491, 1992.
- GUIMARÃES, M. A. d. N. **Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmos de busca tabu**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual de Campinas - UNESP, Campinas, 2005.
- JABR, R. A.; SINGH, R.; PAL, B. C. Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming. **IEEE Transactions on Power systems**, New York, v. 27, n. 2, p. 1106–1115, 2012.
- JAKUS, D.; ČAĐENOVIĆ, R.; VASILJ, J.; SARAJČEV, P. Optimal reconfiguration of distribution networks using hybrid heuristic-genetic algorithm. **Energies**, Basel, v. 13, n. 7, p. 1544, 2020.
- LAVORATO, M.; FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; ROMERO, R. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 27, n. 1, p. 172–180, 2012.
- MANTOVANI, J. R.; CASARI, F.; ROMERO, R. A. Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. **Revista Brasileira de Controle Automação – SBA**, Campinas, v. 11, n. 3, p. 150–159, 2000.
- MERLIN, A.; BACK, H. Search for minimum-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system. **Anais [...]**, Power System Computation Conference, Cambridge, 1975.
- OLIVEIRA, M.; LAVORATO, M.; ROMERO, R. Reconfiguração de sistemas de distribuição utilizando a metaheurística grasp. **XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, Ubatuba, 2011.
- PERALTA, R. G. V. **Reconfiguração de sistemas de distribuição através do algoritmo genético de chaves aleatórias viciadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Ilha Solteira, 2018.
- POSSAGNOLO, L. H. F. M. **Reconfiguração de sistemas de distribuição operando em vários níveis de demanda através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Ilha Solteira, São Paulo, 2015.
- Prim, R. C. Shortest connection networks and some generalizations. **The Bell System Technical Journal**, New York, v. 36, n. 6, p. 1389–1401, 1957.
- RAUT, U.; MISHRA, S. A fast heuristic network reconfiguration algorithm to minimize loss and improve voltage profile for a smart power distribution system. **Anais [...]**, International Conference on Information Technology (ICIT) – IEEE, New York, p. 85–90, 2017.

RITTER, D. **Análise crítica da operação radial dos sistemas de distribuição de energia elétrica**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Ilha Solteira, 2014.

RUPOLO, D. **Reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica através de um algoritmo de busca dispersa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Ilha Solteira, 2013.

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 4, n. 2, p. 1492–1498, 1989.

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W.; SEMLYEN, A.; LUO, G. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. **IEEE Transactions on power systems**, New York, v. 3, n. 2, p. 753–762, 1988.

SILVEIRA, C. L. B. **Análise comparativa de métodos de otimização para a solução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Ilha Solteira, 2020.

SOUZA, S. S. F. d. **Algoritmo GRASP especializado aplicado ao problema de reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição radial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Ilha Solteira, 2013.

ZVIETCOVICH, W. G. **Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando a metaheurística busca em vizinhança variável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Ilha Solteira, 2006.

ANEXO A - DADOS DOS SISTEMAS TESTADOS

A.1 SISTEMA DE 14 BARRAS

Os dados do sistema de 14 barras são descritos na Tabela 11.

- Barra ou nó de referência: 14 (subestação)
- Tensão base do sistema: 23,00 kV
- Potência base: 100.000 kVA

Tabela 11 - Dados do sistema de 14 barras.

Ramo	DADOS DE RAMOS				DADOS DE BARRAS		
	Barra inicial	Barra final	Resistência [%]	Reatância [%]	Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
1	14	13	7,5000	10,0000	1	2.100,00	-800,00
2	13	12	8,0000	11,0000	2	1.000,00	900,00
3	13	11	9,0000	18,0000	3	1.000,00	-1.100,00
4	11	10	4,0000	4,0000	4	1.000,00	900,00
5	14	9	11,0000	11,0000	5	4.500,00	-1.700,00
6	9	8	8,0000	11,0000	6	600,00	-500,00
7	9	7	11,0000	11,0000	7	1.000,00	900,00
8	8	6	11,0000	11,0000	8	5.000,00	1.800,00
9	8	5	8,0000	11,0000	9	4.000,00	2.700,00
10	14	4	11,0000	11,0000	10	1.500,00	1.200,00
11	4	3	9,0000	12,0000	11	2.000,00	-400,00
12	4	2	8,0000	11,0000	12	3.000,00	400,00
13	2	1	4,0000	4,0000	13	2.000,00	1.600,00
14	12	6	4,0000	4,0000	14	0,00	0,00
15	7	3	4,0000	4,0000			
16	10	1	9,0000	12,0000			

Fonte: Civanlar et al. (1988)

A.2 SISTEMA DE 33 BARRAS

Os dados do sistema de 33 barras são descritos na Tabela 12.

- Barra ou nó de referência: 1 (subestação)
- Tensão base do sistema: 12,66 kV
- Potência base: 1.000 kVA

Tabela 12 - Dados do sistema de 33 barras.

Ramo	DADOS DE RAMOS				DADOS DE BARRAS		
	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
1	1	2	0,0922	0,0470	1	0,00	0,00
2	2	3	0,4930	0,2511	2	100,00	60,00
3	3	4	0,3660	0,1864	3	90,00	40,00
4	4	5	0,3811	0,1941	4	120,00	80,00
5	5	6	0,8190	0,7070	5	60,00	30,00
6	6	7	0,1872	0,6188	6	60,00	20,00
7	7	8	0,7114	0,2351	7	200,00	100,00
8	8	9	1,0300	0,7400	8	200,00	100,00
9	9	10	1,0440	0,7400	9	60,00	20,00
10	10	11	0,1966	0,0650	10	60,00	20,00
11	11	12	0,3744	0,1238	11	45,00	30,00
12	12	13	1,4680	1,1550	12	60,00	35,00
13	13	14	0,5416	0,7129	13	60,00	35,00
14	14	15	0,5910	0,5260	14	120,00	80,00
15	15	16	0,7463	0,5450	15	60,00	10,00
16	16	17	1,2890	1,7210	16	60,00	20,00
17	17	18	0,7320	0,5740	17	60,00	20,00
18	2	19	0,1640	0,1565	18	90,00	40,00
19	19	20	1,5042	1,3554	19	90,00	40,00
20	20	21	0,4095	0,4784	20	90,00	40,00
21	21	22	0,7089	0,9373	21	90,00	40,00
22	3	23	0,4512	0,3083	22	90,00	40,00
23	23	24	0,8980	0,7091	23	90,00	50,00
24	24	25	0,8960	0,7011	24	420,00	200,00
25	6	26	0,2030	0,1034	25	420,00	200,00
26	26	27	0,2842	0,1447	26	60,00	25,00
27	27	28	1,0590	0,9337	27	60,00	25,00
28	28	29	0,8042	0,7006	28	60,00	20,00
29	29	30	0,5075	0,2585	29	120,00	70,00

continua na próxima página

Tabela 12 – continuação da página anterior

DADOS DE RAMOS					DADOS DE BARRAS		
Ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
30	30	31	0,9744	0,9630	30	200,00	600,00
31	31	32	0,3105	0,3619	31	150,00	70,00
32	32	33	0,3410	0,5302	32	210,00	100,00
33	8	21	2,0000	2,0000	33	60,00	40,00
34	9	15	2,0000	2,0000			
35	12	22	2,0000	2,0000			
36	18	33	0,5000	0,5000			
37	25	29	0,5000	0,5000			

Fonte: Baran e Wu (1989)

A.3 SISTEMA DE 69 BARRAS

Os dados do sistema de 69 barras são descritos na Tabela 13.

- Barra ou nó de referência: 1 (subestação)
- Tensão base do sistema: 12,66 kV
- Potência base: 1.000 kVA

Tabela 13 - Dados do sistema de 69 barras.

DADOS DE RAMOS					DADOS DE BARRAS		
Ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
1	1	2	0,0005	0,0012	1	0,00	0,00
2	2	3	0,0005	0,0012	2	0,00	0,00
3	3	4	0,0000	0,0000	3	0,00	0,00
4	4	5	0,0015	0,0036	4	0,00	0,00
5	5	6	0,0251	0,0294	5	0,00	0,00
6	6	7	0,3660	0,1864	6	0,00	0,0
7	7	8	0,3811	0,1941	7	0,878	0,72
8	8	9	0,0922	0,0470	8	13,455	9,982
9	9	10	0,0493	0,0251	9	24,887	17,81

continua na próxima página

Tabela 13 – continuação da página anterior

DADOS DE RAMOS					DADOS DE BARRAS		
Ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
10	10	11	0,8190	0,2707	10	10	7,208
11	11	12	0,1872	0,0619	11	9,333	6,666
12	12	13	0,7114	0,2351	12	48,5	34,609
13	13	14	1,0300	0,3400	13	48,5	34,609
14	14	15	1,0440	0,3450	14	2,71	1,821
15	15	16	1,0580	0,3496	15	2,71	1,821
16	16	17	0,1966	0,0650	16	0,00	0,00
17	17	18	0,3744	0,1238	17	15,176	10,198
18	18	19	0,0047	0,0016	18	16,5	11,775
19	19	20	0,3276	0,1083	19	16,5	11,775
20	20	21	0,2106	0,0696	20	0,00	0,00
21	21	22	0,3416	0,1129	21	0,316	0,212
22	22	23	0,0140	0,0046	22	37,983	27,1
23	23	24	0,1591	0,0526	23	1,762	1,184
24	24	25	0,3463	0,1145	24	0,00	0,00
25	25	26	0,7488	0,2475	25	9,39	6,67
26	26	27	0,3089	0,1021	26	0,00	0,00
27	27	28	0,1732	0,0572	27	4,667	3,33
28	3	29	0,0044	0,0108	28	4,667	3,33
29	29	30	0,0640	0,1565	29	8,667	6,185
30	30	31	0,0640	0,1565	30	8,667	6,185
31	31	32	0,0702	0,0232	31	0,00	0,00
32	32	33	0,3510	0,1160	32	0,00	0,00
33	33	34	0,8390	0,2816	33	0,00	0,00
34	34	35	1,7080	0,5646	34	4,582	3,26
35	35	36	1,4740	0,4873	35	6,501	4,549
36	4	37	0,0044	0,0108	36	1,92	1,29
37	37	38	0,0640	0,1565	37	8,667	6,185
38	38	39	0,1053	0,1230	38	8,667	6,185
39	39	40	0,0304	0,0355	39	0,00	0,00
40	40	41	0,0018	0,0021	40	8	5,709
41	41	42	0,7283	0,8509	41	8	5,709
42	42	43	0,3100	0,3623	42	0,392	0,325
43	43	44	0,0410	0,0478	43	0,00	0,00
44	44	45	0,0092	0,0116	44	2	1,427
45	45	46	0,1089	0,1373	45	0,00	0,00
46	46	47	0,0009	0,0012	46	3,076	8,787
47	5	48	0,0034	0,0084	47	3,076	8,787
48	48	49	0,0851	0,2083	48	0,00	0,00

continua na próxima página

Tabela 13 – continuação da página anterior

DADOS DE RAMOS					DADOS DE BARRAS		
Ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
49	49	50	0,2898	0,7091	49	26,35	18,8
50	50	51	0,0822	0,2011	50	28,226	91,492
51	9	52	0,0928	0,0473	51	128,226	91,492
52	52	53	0,3319	0,1114	52	13,512	9,442
53	10	54	0,1740	0,0886	53	1,202	0,894
54	54	55	0,2030	0,1034	54	1,449	1,162
55	55	56	0,2842	0,1447	55	8,787	6,322
56	56	57	0,2813	0,1433	56	8,00	5,708
57	57	58	1,5900	0,5337	57	0,00	0,00
58	58	59	0,7837	0,2630	58	0,00	0,00
59	59	60	0,3042	0,1006	59	0,00	0,00
60	60	61	0,3861	0,1172	60	0,667	24,025
61	61	62	0,5075	0,2555	61	0,00	0,00
62	62	63	0,9740	0,0496	62	414,667	295,91
63	63	64	0,1450	0,0738	63	10,667	7,612
64	64	65	0,7105	0,3619	64	0,00	0,00
65	65	66	1,0410	0,5302	65	75,67	53,873
66	12	67	0,2012	0,0611	66	19,67	13,912
67	67	68	0,0047	0,0017	67	6,00	4,282
68	13	69	0,7394	0,2444	68	6,00	4,282
69	69	70	0,0047	0,0016	69	9,333	6,66
70	12	44	0,5000	0,5000	70	9,333	6,66
71	14	22	0,5000	0,5000			
72	16	47	1,0000	1,0000			
73	51	60	2,0000	2,0000			
74	28	66	1,0000	1,0000			

Fonte: Chiang e Jean-Jumeau (1990b)

A.4 SISTEMA DE 84 BARRAS

Os dados do sistema de 84 barras são descritos na Tabela 14.

- Barra ou nó de referência: 84 (subestação)
- Tensão base do sistema: 11,40 kV

- Potência base: 10.000 kVA

Tabela 14 - Dados do sistema de 84 barras.

DADOS DE RAMOS					DADOS DE BARRAS		
Ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
1	1	84	0,1944	0,6624	1	0,00	0,00
2	1	2	0,2096	0,4304	2	100,00	50,00
3	2	3	0,2358	0,4842	3	300,00	200,00
4	3	4	0,0917	0,1883	4	350,00	250,00
5	4	5	0,2096	0,4304	5	220,00	100,00
6	5	6	0,0393	0,0807	6	1100,00	800,00
7	6	7	0,0405	0,1380	7	400,00	320,00
8	7	8	0,1048	0,2152	8	300,00	200,00
9	7	9	0,2358	0,4842	9	300,00	230,00
10	7	10	0,1048	0,2152	10	300,00	260,00
11	11	84	0,0786	0,1614	11	0,90	0,00
12	11	12	0,3406	0,6944	12	1200,00	800,00
13	12	13	0,0262	0,0538	13	800,00	600,00
14	12	14	0,0786	0,1614	14	700,00	500,00
15	15	84	0,1134	0,3864	15	0,00	0,00
16	15	16	0,0524	0,1076	16	300,00	150,00
17	16	17	0,0524	0,1076	17	500,00	350,00
18	17	18	0,1572	0,3228	18	700,00	400,00
19	18	19	0,0393	0,0807	19	1200,00	1000,00
20	19	20	0,1703	0,3497	20	300,00	300,00
21	20	21	0,2358	0,4842	21	400,00	350,00
22	21	22	0,1572	0,3228	22	50,00	20,00
23	21	23	0,1965	0,4035	23	50,00	20,00
24	23	24	0,1310	0,2690	24	50,00	10,00
25	25	84	0,0567	0,1932	25	50,00	30,00
26	25	26	0,1048	0,2152	26	100,00	60,00
27	26	27	0,2489	0,5111	27	100,00	70,00
28	27	28	0,0486	0,1656	28	1800,00	1300,00
29	28	29	0,1310	0,2690	29	200,00	120,00
30	30	84	0,1965	0,3960	30	0,00	0,00
31	30	31	0,1310	0,2690	31	1800,00	1600,00
32	31	32	0,1310	0,2690	32	200,00	150,00
33	32	33	0,0262	0,0538	33	200,00	100,00
34	33	34	0,1703	0,3497	34	800,00	600,00
35	34	35	0,0524	0,1076	35	100,00	60,00
36	35	36	0,4978	1,0222	36	100,00	60,00
37	36	37	0,0393	0,0807	37	20,00	10,00
38	37	38	0,0393	0,0807	38	20,00	10,00

continua na próxima página

Tabela 14 – continuação da página anterior

DADOS DE RAMOS					DADOS DE BARRAS		
Ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
39	38	39	0,0786	0,1614	39	20,00	10,00
40	39	40	0,2096	0,4304	40	20,00	10,00
41	38	41	0,1965	0,4035	41	200,00	160,00
42	41	42	0,2096	0,4304	42	50,00	30,00
43	43	84	0,0486	0,1656	43	0,00	0,00
44	43	44	0,0393	0,0807	44	30,00	20,00
45	44	45	0,1310	0,2690	45	800,00	700,00
46	45	46	0,2358	0,4842	46	200,00	150,00
47	47	84	0,2430	0,8280	47	0,00	0,00
48	47	48	0,0655	0,1345	48	0,00	0,00
49	48	49	0,0655	0,1345	49	0,00	0,00
50	49	50	0,0393	0,0807	50	200,00	160,00
51	50	51	0,0786	0,1614	51	800,00	600,00
52	51	52	0,0393	0,0807	52	500,00	300,00
53	52	53	0,0786	0,1614	53	500,00	350,00
54	53	54	0,0524	0,1076	54	500,00	300,00
55	54	55	0,1310	0,2690	55	200,00	80,00
56	56	84	0,2268	0,7728	56	0,00	0,00
57	56	57	0,5371	1,1029	57	30,00	20,00
58	57	58	0,0524	0,1076	58	600,00	420,00
59	58	59	0,0405	0,1380	59	0,00	0,00
60	59	60	0,0393	0,0807	60	20,00	10,00
61	60	61	0,0262	0,0538	61	20,00	10,00
62	61	62	0,1048	0,2152	62	200,00	130,00
63	62	63	0,2358	0,4842	63	300,00	240,00
64	63	64	0,0243	0,0828	64	300,00	200,00
65	65	84	0,0486	0,1656	65	0,00	0,00
66	65	66	0,1703	0,3497	66	50,00	30,00
67	66	67	0,1215	0,4140	67	0,00	0,00
68	67	68	0,2187	0,7452	68	400,00	360,00
69	68	69	0,0486	0,1656	69	0,00	0,00
70	69	70	0,0729	0,2484	70	0,00	0,00
71	70	71	0,0567	0,1932	71	2000,00	1500,00
72	71	72	0,0262	0,0528	72	200,00	150,00
73	73	84	0,3240	1,1040	73	0,00	0,00
74	73	74	0,0324	0,1104	74	0,00	0,00
75	74	75	0,0567	0,1932	75	1200,00	950,00
76	75	76	0,0486	0,1656	76	300,00	180,00
77	77	84	0,2511	0,8556	77	0,00	0,00

continua na próxima página

Tabela 14 – continuação da página anterior

DADOS DE RAMOS					DADOS DE BARRAS		
Ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
78	77	78	0,1296	0,4416	78	400,00	360,00
79	78	79	0,0486	0,1656	79	2000,00	1300,00
80	79	80	0,1310	0,2640	80	200,00	140,00
81	80	81	0,1310	0,2640	81	500,00	360,00
82	81	82	0,0917	0,1883	82	100,00	30,00
83	82	83	0,3144	0,6456	83	400,00	360,00
84	5	55	0,1310	0,2690	84	0,00	0,00
85	7	60	0,1310	0,2690			
86	11	43	0,1310	0,2690			
87	12	72	0,3406	0,6994			
88	13	76	0,4585	0,9415			
89	14	18	0,5371	1,0824			
90	16	26	0,0917	0,1883			
91	20	83	0,0786	0,1614			
92	28	32	0,0524	0,1076			
93	29	39	0,0786	0,1614			
94	34	46	0,0262	0,0538			
95	40	42	0,1965	0,4035			
96	53	64	0,0393	0,0807			

Fonte: Chiou et al. (2005)

A.5 SISTEMA DE 136 BARRAS

Os dados do sistema de 136 barras são descritos na Tabela 15.

- Barra ou nó de referência: 136 (subestação)
- Tensão base do sistema: 13,8 kV
- Potência base: 100.000 kVA

Tabela 15 - Dados do sistema de 136 barras.

DADOS DE RAMOS					DADOS DE BARRAS		
Ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
1	136	1	0,33205	0,76653	136	0,00	0,00
2	1	2	0,00188	0,00433	1	0,00	0,00
3	2	3	0,22324	0,51535	2	47,780	19,009
4	3	4	0,09943	0,22953	3	42,551	16,929
5	4	5	0,15571	0,35945	4	87,022	34,622
6	5	6	0,16321	0,37677	5	311,310	123,855
7	6	7	0,11444	0,26417	6	148,869	59,228
8	6	8	0,05675	0,05666	7	238,672	94,956
9	8	9	0,52124	0,27418	8	62,299	24,786
10	8	10	0,10877	0,10860	9	124,598	49,571
11	10	11	0,39803	0,20937	10	140,175	55,768
12	10	12	0,91744	0,31469	11	116,813	46,474
13	10	13	0,11823	0,11805	12	249,203	99,145
14	13	14	0,50228	0,26421	13	291,447	115,952
15	13	15	0,05675	0,05666	14	303,720	120,835
16	15	16	0,29379	0,15454	15	215,396	85,695
17	136	17	0,33205	0,76653	16	198,586	79,007
18	17	18	0,00188	0,00433	17	0,00	0,00
19	18	19	0,22324	0,51535	18	0,00	0,00
20	19	20	0,10881	0,25118	19	0,00	0,00
21	20	21	0,71078	0,37388	20	30,127	14,729
22	20	22	0,18197	0,42008	21	230,972	112,920
23	22	23	0,30326	0,15952	22	60,256	29,458
24	22	24	0,02439	0,05630	23	230,972	112,920
25	24	25	0,04502	0,10394	24	120,507	58,915
26	25	26	0,01876	0,04331	25	0,00	0,00
27	26	27	0,11823	0,11805	26	56,981	27,857
28	27	28	0,02365	0,02361	27	364,665	178,281
29	28	29	0,18954	0,09970	28	0,00	0,00
30	29	30	0,39803	0,20937	29	124,647	60,939
31	28	31	0,05675	0,05666	30	56,981	27,857
32	31	32	0,09477	0,04985	31	0,00	0,00
33	32	33	0,41699	0,21934	32	85,473	41,787
34	33	34	0,11372	0,05982	33	0,0	0,00
35	31	35	0,07566	0,07555	34	396,735	193,960
36	35	36	0,36960	0,19442	35	0,00	0,00
37	36	37	0,26536	0,13958	36	181,152	88,563
38	35	38	0,05675	0,05666	37	242,172	118,395
39	136	39	0,33205	0,76653	38	75,316	36,821
40	39	40	0,11819	0,27283	39	0,00	0,00

continua na próxima página

Tabela 15 – continuação da página anterior

Ramo	DADOS DE RAMOS				DADOS DE BARRAS		
	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
41	40	41	2,96288	1,01628	40	1,254	0,531
42	40	42	0,00188	0,00433	41	6,274	2,660
43	42	43	0,06941	0,16024	42	0,00	0,00
44	43	44	0,81502	0,42872	43	117,880	49,971
45	43	45	0,06378	0,14724	44	62,668	26,566
46	45	46	0,13132	0,30315	45	172,285	73,034
47	46	47	0,06191	0,14291	46	458,556	194,388
48	47	48	0,11444	0,26417	47	262,962	111,473
49	48	49	0,28374	0,28331	48	235,761	99,942
50	49	50	0,28374	0,28331	49	0,00	0,00
51	48	51	0,04502	0,10394	50	109,215	46,298
52	51	52	0,02626	0,06063	51	0,00	0,00
53	52	53	0,06003	0,13858	52	72,809	30,865
54	53	54	0,03002	0,06929	53	258,473	109,570
55	54	55	0,02064	0,04764	54	69,169	29,322
56	52	56	0,10881	0,25118	55	21,843	9,260
57	56	57	0,25588	0,13460	56	0,00	0,00
58	57	58	0,41699	0,21934	57	20,527	8,702
59	58	59	0,50228	0,26421	58	150,548	63,819
60	59	60	0,33170	0,17448	59	220,687	93,552
61	60	61	0,20849	0,10967	60	92,384	39,163
62	47	62	0,13882	0,32047	61	0,00	0,00
63	136	63	0,00750	0,01732	62	226,693	96,098
64	63	64	0,27014	0,62362	63	0,00	0,00
65	64	65	0,38270	0,88346	64	294,016	116,974
66	65	66	0,33018	0,76220	65	83,015	33,028
67	66	67	0,32830	0,75787	66	83,015	33,028
68	67	68	0,17072	0,39409	67	103,770	41,285
69	68	69	0,55914	0,29412	68	176,408	70,184
70	68	70	0,05816	0,13425	69	83,015	33,028
71	70	71	0,70130	0,36890	70	217,917	86,698
72	71	72	1,02352	0,53839	71	23,294	9,267
73	70	73	0,06754	0,15591	72	5,075	2,019
74	73	74	1,32352	0,45397	73	72,638	28,899
75	136	75	0,01126	0,02598	74	405,990	161,523
76	75	76	0,72976	1,68464	75	0,00	0,00
77	76	77	0,22512	0,51968	76	100,182	42,468
78	77	78	0,20824	0,48071	77	142,523	60,417
79	78	79	0,04690	0,10827	78	96,042	40,713
80	79	80	0,61950	0,61857	79	300,454	127,366

continua na próxima página

Tabela 15 – continuação da página anterior

Ramo	DADOS DE RAMOS				DADOS DE BARRAS		
	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
81	80	81	0,34049	0,33998	80	141,238	59,873
82	81	82	0,56862	0,29911	81	279,847	118,631
83	81	83	0,10877	0,10860	82	87,312	37,013
84	83	84	0,56862	0,29911	83	243,849	103,371
85	136	85	0,01126	0,02598	84	247,750	105,025
86	85	86	0,41835	0,96575	85	0,00	0,00
87	86	87	0,10499	0,13641	86	89,878	38,101
88	86	88	0,43898	1,01338	87	1137,28	482,108
89	88	89	0,07520	0,02579	88	458,339	194,296
90	89	90	0,07692	0,17756	89	385,197	163,290
91	90	91	0,33205	0,76653	90	0,00	0,00
92	91	92	0,08442	0,19488	91	79,608	33,747
93	92	93	0,13320	0,30748	92	87,312	37,013
94	93	94	0,29320	0,29276	93	0,00	0,00
95	94	95	0,21753	0,21721	94	74,001	31,370
96	95	96	0,26482	0,26443	95	232,050	98,369
97	93	97	0,10318	0,23819	96	141,819	60,119
98	97	98	0,13507	0,31181	97	0,00	0,00
99	136	99	0,00938	0,02165	98	76,449	32,408
100	99	100	0,16884	0,38976	99	0,00	0,00
101	100	101	0,11819	0,27283	100	51,322	21,756
102	101	102	2,28608	0,78414	101	59,874	25,381
103	101	103	0,45587	1,05236	102	9,065	3,843
104	103	104	0,69600	1,60669	103	2,092	0,887
105	104	105	0,45774	1,05669	104	16,735	7,094
106	105	106	0,20298	0,26373	105	1506,52	638,634
107	106	107	0,21348	0,27737	106	313,023	132,694
108	107	108	0,54967	0,28914	107	79,831	33,842
109	108	109	0,54019	0,28415	108	51,322	21,756
110	107	110	0,04550	0,05911	109	0,00	0,00
111	110	111	0,47385	0,24926	110	202,435	85,815
112	111	112	0,86241	0,45364	111	60,823	25,784
113	112	113	0,56862	0,29911	112	45,618	19,338
114	108	114	0,77711	0,40878	113	0,00	0,00
115	114	115	1,08038	0,56830	114	157,070	66,584
116	109	116	1,09933	0,57827	115	0,00	0,00
117	116	117	0,47385	0,24926	116	250,148	106,041
118	104	118	0,32267	0,74488	117	0,00	0,00
119	118	119	0,14633	0,33779	118	69,809	29,593
120	119	120	0,12382	0,28583	119	32,072	13,596

continua na próxima página

Tabela 15 – continuação da página anterior

Ramo	DADOS DE RAMOS				DADOS DE BARRAS		
	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
121	136	121	0,01126	0,02598	120	61,084	25,894
122	121	122	0,64910	1,49842	121	0,00	0,00
123	122	123	0,04502	0,10394	122	94,622	46,260
124	123	124	0,52640	0,18056	123	49,858	24,375
125	123	125	0,02064	0,04764	124	123,164	60,214
126	125	126	0,53071	0,27917	125	78,350	38,304
127	125	127	0,09755	0,22520	126	145,475	71,121
128	127	128	0,11819	0,27283	127	21,369	10,447
129	127	129	0,13882	0,32047	128	74,789	36,564
130	129	130	0,04315	0,09961	129	227,926	111,431
131	130	131	0,09192	0,21220	130	35,614	17,411
132	131	132	0,16134	0,37244	131	249,295	121,877
133	132	133	0,37832	0,37775	132	316,722	154,842
134	133	134	0,39724	0,39664	133	333,817	163,199
135	134	135	0,29320	0,29276	134	249,295	121,877
136	7	73	0,13132	0,30315	135	0,00	0,00
137	9	24	0,26536	0,13958			
138	15	83	0,14187	0,14166			
139	38	135	0,08512	0,08499			
140	25	51	0,04502	0,10394			
141	50	96	0,14187	0,14166			
142	55	98	0,14187	0,14166			
143	62	120	0,03940	0,09094			
144	66	79	0,12944	0,29882			
145	79	131	0,01688	0,03898			
146	84	135	0,33170	0,17448			
147	91	104	0,14187	0,14166			
148	90	129	0,07692	0,17756			
149	90	103	0,07692	0,17756			
150	92	104	0,07692	0,17756			
151	92	132	0,07692	0,17756			
152	96	120	0,26482	0,26443			
153	110	47	0,49696	0,64567			
154	126	76	0,17059	0,08973			
155	128	77	0,05253	0,12126			
156	135	98	0,29320	0,29276			

Fonte: Mantovani et al. (2000)

ANEXO B - ALGORITMO DE FLUXO DE CARGA PARA SISTEMAS RADIAIS E FRACAMENTE MALHADOS

Para o desenvolvimento do AHC de Merlin e Back (1975) apresentado no Capítulo 2, o algoritmo de PRIM apresentado no Capítulo 3 e também o algoritmo proposto neste trabalho apresentado no Capítulo 4, é necessária a implementação de um algoritmo de fluxo de carga para sistemas de distribuição radiais e para sistemas fracamente malhados.

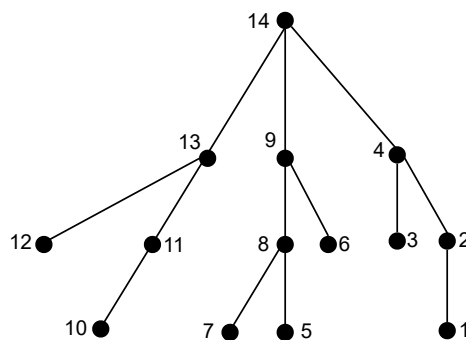
O problema de fluxo de carga pode ser modelado matematicamente como um sistema de equações algébricas não lineares, na qual a solução pode ser obtida utilizando o método iterativo de Newton. No entanto, será utilizado o método de fluxo de carga conhecido como método de varredura (SHIRMOHAMMADI et al., 1988), por ser muito adequado para trabalhar com o sistema de distribuição. O método é conhecido como varredura por seu processo iterativo que realiza um percurso das barras terminais em direção à barra de referência e vice-versa.

B.1 O problema de fluxo de carga para sistemas radiais

O primeiro passo do método de varredura para sistemas radiais é renumerar ou reordenar as barras do sistema na estrutura de camadas, na qual as barras de uma camada são renumerados antes de se iniciar a renumeração da camada seguinte. A primeira camada corresponde às barras ligadas à subestação. A próxima camada constitui-se das barras ligados à primeira camada e as próximas camadas são determinadas seguindo a mesma lógica.

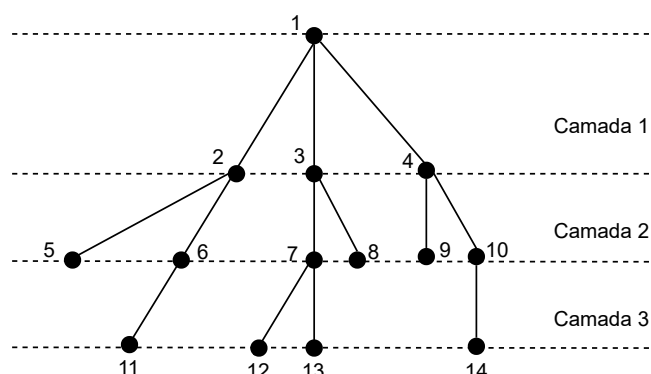
A Figura 26 ilustra um sistema de distribuição com a numeração original das barras e a Figura 27 mostra o mesmo sistema após as barras serem renumerados utilizando a lógica de camadas.

Figura 26 - Sistema de distribuição radial.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 27 - Sistema de distribuição radial com ramos ordenados em camadas.



Fonte: Elaborado pela autora.

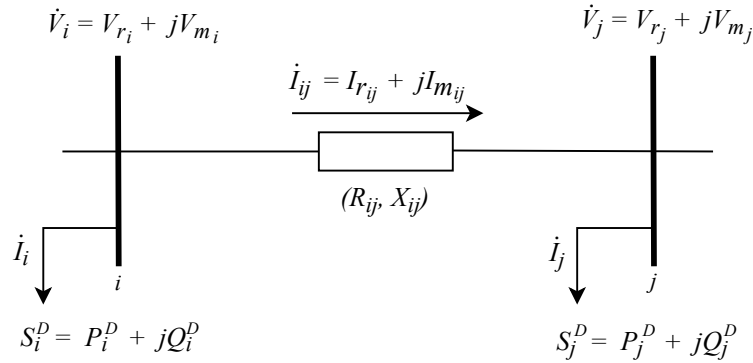
O processo de resolução do algoritmo é iniciado definindo-se um valor inicial para os módulos de tensão nas barras, que normalmente são iguais à tensão da subestação. Com as tensões nas barras definidas, calcula-se a corrente de carga em todas as barras e as correntes em todos os ramos do sistema radial. Este processo é denominado de *backward*. Com as correntes calculadas nos ramos é possível calcular as perdas do sistema de forma aproximada e também a corrente que está saindo da subestação.

Com os valores de correntes nos ramos calculados no processo *backward* e partindo da subestação, realiza-se o cálculo dos novos valores das tensões em todas as barras do sistema, processo conhecido como *forward*. Com os novos valores de tensão de todas as barras, pode ser calculado novamente os valores de correntes de carga nas barras e as correntes em todos os ramos do sistema e, com estes novos valores de corrente nos ramos, é possível encontrar novos valores de perdas no sistema e novos valores de tensões nas barras.

O algoritmo possui um critério de parada que é expresso por meio da variação de perdas entre duas iterações consecutivas. O processo iterativo do algoritmo de fluxo de carga para sistemas radiais termina quando a variação das perdas ativas entre duas iterações consecutivas, expressas como $|\Delta P_a|$ é menor que uma tolerância especificada ε , ou seja, quando $|\Delta P_a| \leq \varepsilon$.

A Figura 28 representa um trecho de um sistema de distribuição com duas barras, a partir do qual são feitas as deduções apresentadas a seguir.

Figura 28 - Trecho de um sistema de distribuição radial.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 28, R_{ij} e X_{ij} são a resistência e a reatância do ramo ij , respectivamente. S_i^D é a potência complexa demandada na barra i , P_i^D e Q_i^D são as potências ativa e reativa demandadas na barra i , respectivamente. \dot{V}_i é o fasor tensão na barra i , V_{r_i} e V_{m_i} são as partes real e imaginária de \dot{V}_i , respectivamente. \dot{I}_i é o fasor corrente absorvido pela carga na barra i , \dot{I}_{ij} é o fasor corrente no ramo ij , $I_{r_{ij}}$ e $I_{m_{ij}}$ são as partes real e imaginária de \dot{I}_{ij} , respectivamente.

• Cálculo das correntes nos ramos

No processo *backward*, calculam-se as correntes absorvidas pelas cargas nas barras e as correntes dos ramos do sistema. As deduções para se obter as expressões das correntes nos ramos são descritas.

A potência e a tensão complexas na barra i são definidas respectivamente por (20) e (21).

$$S_i^D = P_i^D + jQ_i^D \quad (20)$$

$$\dot{V}_i = V_{r_i} + jV_{m_i} \quad (21)$$

Em que P_i^D e Q_i^D são a potência ativa e reativa demandadas pela barra i , respectivamente. V_{r_i} e V_{m_i} são as componentes real e imaginária de tensão da barra i , respectivamente.

A corrente absorvida pela demanda da barra i é expressa como mostrado em (22).

$$\dot{I}_i = \left(\frac{S_i^D}{\dot{V}_i} \right)^* \quad (22)$$

Substituindo (20) e (21) em (22), obtém-se (23).

$$\dot{I}_i = \left(\frac{P_i^D + jQ_i^D}{V_{r_i} + jV_{m_i}} \right)^* = \left(\frac{P_i^D + jQ_i^D}{V_{r_i} + jV_{m_i}} \cdot \frac{V_{r_i} - jV_{m_i}}{V_{r_i} - jV_{m_i}} \right)^* \quad (23)$$

Com (23), obtêm-se (24).

$$\dot{I}_i = \frac{(P_i^D V_{r_i} + Q_i^D V_{m_i}) + j(P_i^D V_{m_i} - Q_i^D V_{r_i})}{(V_{r_i})^2 + (V_{m_i})^2} \quad (24)$$

Separando a equação (24) em parte real e imaginária, têm-se (25) e (26), respectivamente.

$$I_{r_i} = \frac{P_i^D V_{r_i} + Q_i^D V_{m_i}}{(V_{r_i})^2 + (V_{m_i})^2} \quad (25)$$

$$I_{m_i} = \frac{P_i^D V_{m_i} - Q_i^D V_{r_i}}{(V_{r_i})^2 + (V_{m_i})^2} \quad (26)$$

A corrente no ramo ij é dada pela equação (27).

$$\dot{I}_{ij} = I_{r_{ij}} + jI_{m_{ij}} \quad (27)$$

Onde I_{ij} e jI_{ij} são a parte real e imaginária da corrente no ramo ij , respectivamente. A maneira como se calculam as correntes nos ramos é dada pela equação (28).

$$\dot{I}_{ij} = \dot{I}_j + \sum_{j'l \in \Omega_l} \dot{I}_{jl} \quad (28)$$

Sendo j a barra mais distante da subestação no ramo ij . I_j é a corrente absorvida pela carga da barra j . O somatório corresponde aos fluxos de corrente nos ramos ligados à barra j que pertencem às camadas inferiores. Ω_l é o conjunto de ramos do sistema. A equação (28) é aplicada da última para a primeira camada. É o procedimento da soma de correntes no processo *backward*.

• Cálculo das tensões nas barras

No processo *forward* é realizado o cálculo das tensões nas barras do sistema, em que se realiza uma varredura que parte da subestação até a barra terminal. Deve-se calcular a tensão na barra j a partir da tensão na barra i , que é a considerada mais próxima da subestação.

As equações (29) e (30) mostram uma forma de obter a tensão na barra i a partir da tensão na barra j .

$$\dot{V}_i = V_{r_i} + jV_{m_i} = \dot{V}_j + (R_{ij} + jX_{ij})(I_{r_{ij}} + jI_{m_{ij}}) \quad (29)$$

$$V_{r_i} + jV_{m_i} = V_{r_j} + jV_{m_j} + (R_{ij}I_{r_{ij}} - X_{ij}I_{m_{ij}}) + j(R_{ij}I_{m_{ij}} + X_{ij}I_{r_{ij}}) \quad (30)$$

Separando em partes real e imaginária, obtêm-se (31) e (32).

$$V_{r_j} = V_{r_i} - R_{ij}I_{r_{ij}} + X_{ij}I_{m_{ij}} \quad (31)$$

$$V_{m_j} = V_{m_i} - R_{ij}I_{m_{ij}} - X_{ij}I_{r_{ij}} \quad (32)$$

Dessa forma, pode-se realizar o cálculo de todas as tensões das barras partindo da subestação até as barras terminais.

- **Cálculo das perdas**

Calculadas as tensões e as correntes do sistema, é possível deduzir as equações das perdas ativas e reativas nos ramos e no sistema. As perdas ativas e reativas em cada ramo ij podem ser obtidas, respectivamente, através de (33) e (34).

$$P_{a_{ij}} = R_{ij}(I_{ij})^2 \quad (33)$$

$$Q_{r_{ij}} = X_{ij}(I_{ij})^2 \quad (34)$$

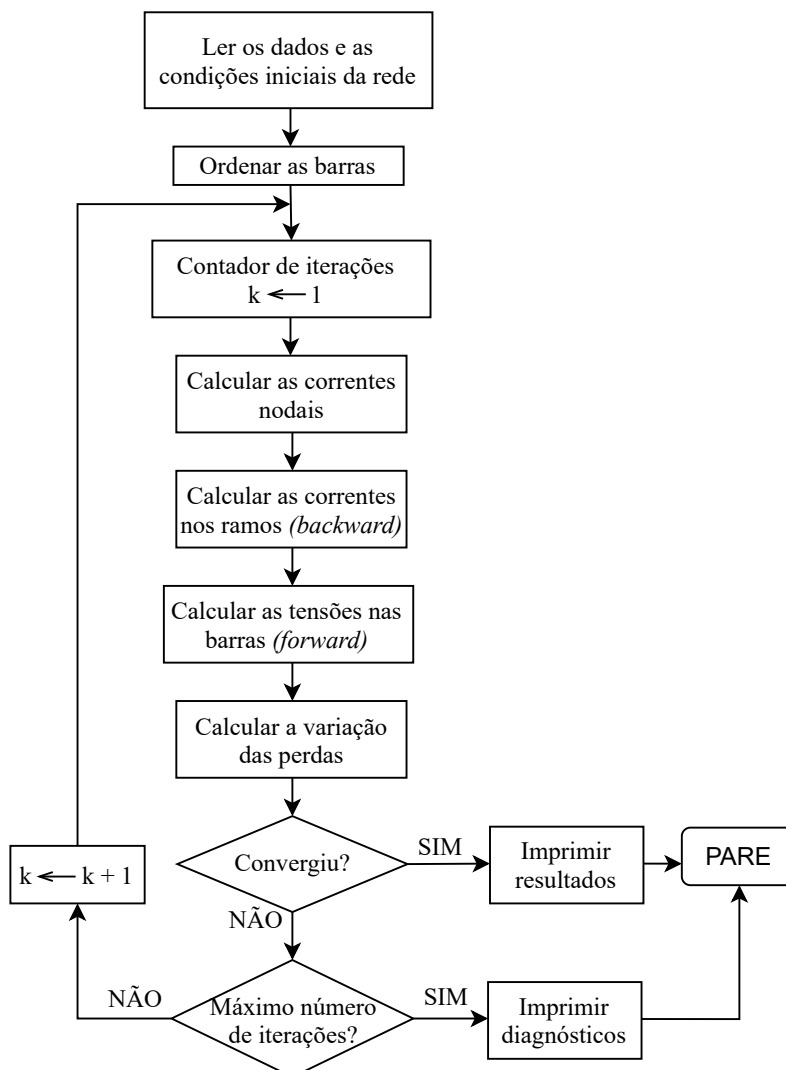
As perdas ativas e reativas totais no sistema são dadas respectivamente por (35) e (36).

$$P_a = \sum_{ij \in \Omega_l} R_{ij}(I_{ij})^2 \quad (35)$$

$$Q_r = \sum_{ij \in \Omega_l} X_{ij}(I_{ij})^2 \quad (36)$$

A Figura 29 apresenta o fluxograma do algoritmo de fluxo de carga para sistemas radiais utilizando o método de varredura.

Figura 29 - Algoritmo de fluxo de carga de varredura para sistemas radiais.

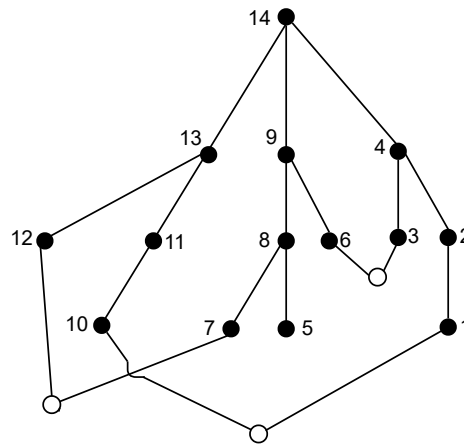


Fonte: Shirmohammadi et al. (1988).

B.2 O problema de fluxo de carga para sistemas fracamente malhados

Para resolver o problema de fluxo de carga para um sistema fracamente malhado é necessário transformá-lo em um sistema radial. Ao seccionar a rede em *breakpoints*, ela pode ser convertida em uma rede radial. A quantidade desses seccionamentos feitos na rede é igual ao número de malhas independentes que existem no sistema. A Figura 30 ilustra um exemplo de um sistema de distribuição fracamente malhado contendo três laços independentes que ao selecionar três pontos de ruptura (*breakpoints*), converte o sistema a uma configuração radial.

Figura 30 - Sistema de distribuição fracamente malhado.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nos ramos, as correntes interrompidas pela criação dos *breakpoints* podem ser substituídas por injeções de correntes em ambos nós terminais, sem afetar a condição de operação do sistema.

Ao aplicar o fluxo de carga para sistemas radiais, a corrente no *breakpoint* j , I_j , é injetada com igual magnitude e polaridade oposta em ambos os terminais do *breakpoint*, como mostram (37) e (38).

$$\dot{I}_{j1} = -\dot{I}_j \quad (37)$$

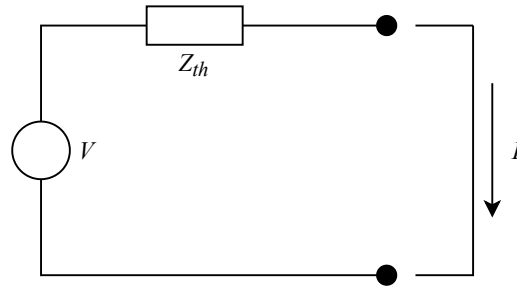
$$\dot{I}_{j2} = \dot{I}_j \quad (38)$$

Em que $j1$ e $j2$ são os dois terminais correspondentes ao *breakpoint* j , \dot{I}_{j1} e \dot{I}_{j2} são as injeções de correntes nodais nestes nós, \dot{I}_j é a corrente no *breakpoint* j .

As correntes nodais \dot{I}_j e $-\dot{I}_j$ devem ser somadas quando na presença de correntes nodais nos nós de *breakpoints*, devido a elementos *shunt* e/ou cargas. Após \dot{I}_{j1} e \dot{I}_{j2} serem atualizadas, é possível utilizar os processos de *backward* e *forward* do método de varredura para redes radiais.

- **Cálculo das correntes nos *breakpoints* usando o método de compensação**

O processo de cálculo das correntes nos *breakpoints* é feito utilizando o método de compensação multiporta apresentado por Tinney (1972). O sistema radial que resulta da abertura dos *breakpoints* pode ser representado como um circuito multiporta, com os nós dos *breakpoints* formando as portas do circuito. Para uma rede linear, o equivalente multiporta é o circuito equivalente de Thévenin da rede radial vista pelos *breakpoints* (POSSAGNOLO, 2015). Neste circuito equivalente de Thévenin, a tensão V é o vetor de tensões de circuito aberto nos *breakpoints*, como mostrado na Figura 31.

Figura 31 - Circuito equivalente de Thévenin da rede vista pelos *breakpoints*.

Fonte: Shirmohammadi et al. (1988).

A equação (39) descreve o circuito da Figura 31.

$$V = Z_{th}I \quad (39)$$

Todavia, quando há cargas de potência constante, a rede de distribuição é não linear e desta forma a equação (39) não é adequada, portanto não pode ser aplicada (SHIRMOHAMMADI et al., 1988).

- **Cálculo da matriz de impedâncias equivalentes vista pelos *breakpoints***

A matriz de impedâncias equivalentes de Thévenin, que são as vistas pelos *breakpoints*, pode ser descrita utilizando-se o método descrito aqui.

A equação (39) pode ser representada como (40)

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \vdots \\ \dot{V}_j \\ \vdots \\ \dot{V}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{11} & \cdots & \bar{Z}_{1j} & \cdots & \bar{Z}_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{Z}_{j1} & \cdots & \bar{Z}_{jj} & \cdots & \bar{Z}_{jp} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{Z}_{p1} & \cdots & \bar{Z}_{pj} & \cdots & \bar{Z}_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_j \\ \vdots \\ \dot{I}_p \end{bmatrix} \quad (40)$$

em que $\bar{Z}_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$. p é o número de *breakpoints*. Nos *breakpoints*, essa matriz de impedância equivalente é baseada nos pressupostos de que as cargas e outros elementos de conexão não são representadas na matriz e todas as tensões nos nós são próximas a 1 pu. e ângulos de fase próximos a 0. Sem cargas, a solução do fluxo de carga para sistemas radiais pode ser alcançada com uma iteração. Cada uma das tensões nos *breakpoints* pode ser estabelecida subtraindo-se as tensões nos dois terminais de cada um deles. O processo deve ser repetido para todos os *breakpoints*, até que todas as colunas da matriz de impedâncias vistas pelos *breakpoints* estejam preenchidas (SHIRMOHAMMADI et al., 1988).

- **Processo iterativo de compensação**

O processo iterativo de compensação (SHIRMOHAMMADI et al., 1988) para calcular as correntes nos *breakpoints* utilizando o circuito equivalente de Thévenin, é apresentado a seguir:

1. Montar a matriz de impedâncias equivalentes de Thévenin vistas pelos *breakpoints* Z_{th} , mantendo-a constante durante o processo de compensação;
2. Calcular a tensão equivalente de Thévenin (vetor de tensões nos *breakpoints*, V) da rede radial através dos processos de *backward* e *forward*, incluindo as correntes nos *breakpoints* calculadas na iteração anterior do processo de compensação. O valor inicial das correntes nos *breakpoints* é zero;
3. Calcular a mudança incremental nas correntes dos *breakpoints* usando o circuito equivalente de Thévenin. Na iteração k , a mudança incremental das correntes nos *breakpoints* é dada por (41).

$$\Delta I^{(k)} = Z_{th}^{-1} V^{(k)} \quad (41)$$

A equação (41) pode ser representada como mostrado em (42).

$$\begin{bmatrix} \Delta I_r^{(k)} \\ \Delta I_m^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{th}^r & -Z_{th}^m \\ Z_{th}^m & Z_{th}^r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta V_r^{(k)} \\ \Delta V_m^{(k)} \end{bmatrix} \quad (42)$$

$\Delta I_r^{(k)}$ e $\Delta I_m^{(k)}$ são os vetores com as partes real e imaginária do vetor $\Delta I^{(k)}$ respectivamente, Z_{th}^r e Z_{th}^m são matrizes com as partes real e imaginária da matriz Z^m respectivamente, e $\Delta V_r^{(k)}$ e $\Delta V_m^{(k)}$ são vetores com as partes real e imaginária do vetor $\Delta V^{(k)}$ respectivamente.

4. Atualizar as correntes nos *breakpoints*, na iteração k , conforme (43).

$$I^{(k)} = I^{(k-1)} + \Delta I^{(k)} \quad (43)$$

A equação (43) pode ser representada como mostrado em (44).

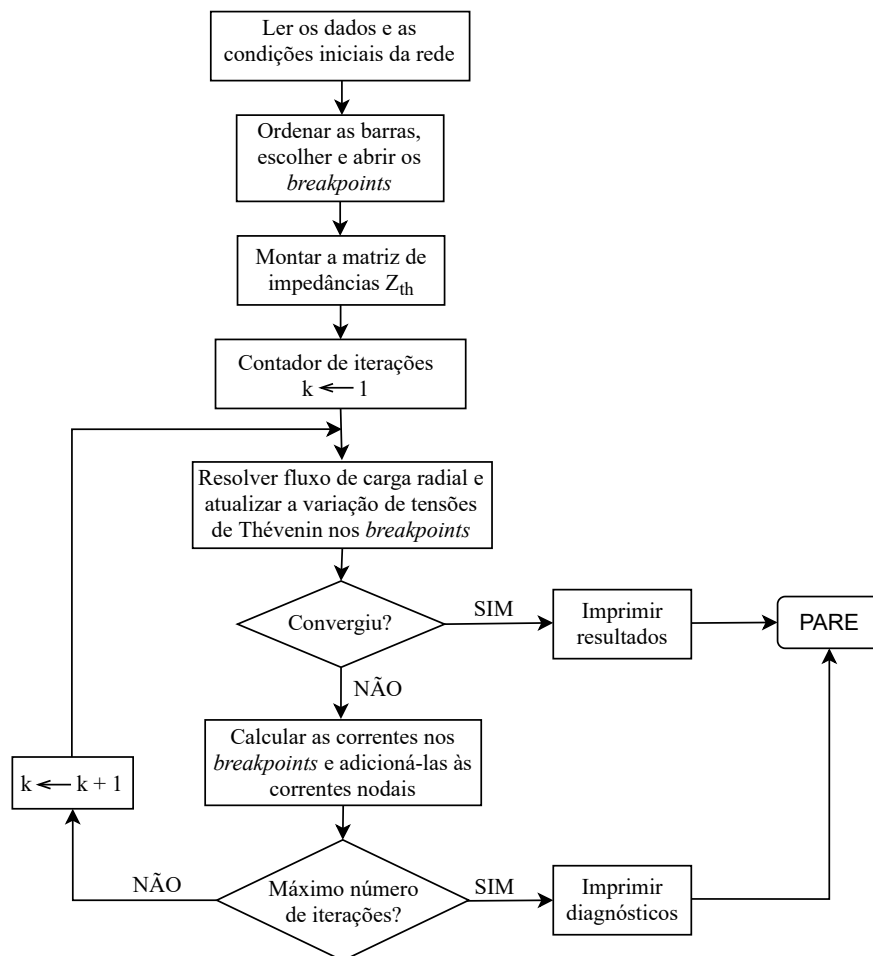
$$\begin{bmatrix} I_r^{(k)} \\ I_m^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_r^{(k-1)} \\ I_m^{(k-1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta I_r^{(k)} \\ \Delta I_m^{(k)} \end{bmatrix} \quad (44)$$

$I_r^{(k)}$ e $I_m^{(k)}$ são os vetores que representam a parte real e a imaginária do vetor $I^{(k)}$ respectivamente.

5. Repetir os passos 2, 3 e 4 até atingir a convergência (a máxima tensão nos *breakpoints*, calculada no passo 2 deve estar dentro do limite especificado).

A Figura 32 mostra o fluxograma do método de cálculo do fluxo de carga para sistemas fracamente malhados.

Figura 32 - Algoritmo de fluxo de carga de varredura para sistemas fracamente malhados.



Fonte: Shirmohammadi et al. (1988).