

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**OTIMIZAÇÃO SIMULTÂNEA DA RECONFIGURAÇÃO E DA ALOCAÇÃO DE  
BANCOS DE CAPACITORES EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS  
UTILIZANDO UMA ESTRATÉGIA MULTIPARTIDA**

**MÁRCIO MASATOSHI MONTSUTSUMI**

**Dissertação de Mestrado**

Ilha Solteira  
2017

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**OTIMIZAÇÃO SIMULTÂNEA DA RECONFIGURAÇÃO E DA ALOCAÇÃO DE  
BANCOS DE CAPACITORES EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS  
UTILIZANDO UMA ESTRATÉGIA MULTIPARTIDA**

**MÁRCIO MASATOSHI MONTSUTSUMI**

**RUBÉN AUGUSTO ROMERO LÁZARO**  
**Orientador**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista – UNESP – Campus de Ilha Solteira, como parte dos requisitos para obtenção do título de *Mestre em Engenharia Elétrica*.  
Área do Conhecimento: Automação.

Ilha Solteira  
2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M813o Montsutsumi, Márcio Masatoshi.  
Otimização simultânea da reconfiguração e da alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição radiais utilizando uma estratégia multipartida / Márcio Masatoshi Montsutsumi. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017  
89 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2017

Orientador: Rubén Augusto Romero Lázaro  
Inclui bibliografia

1. Reconfiguração de sistema. 2. Alocação de bancos de capacitores. 3. Meta-heurística. 4. Fluxo de potência ativa.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** Otimização simultânea da reconfiguração e da alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição radiais utilizando uma estratégia multipartida

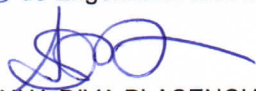
**AUTOR: MÁRCIO MASATOSHI MONTSUTSUMI**

**ORIENTADOR: RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: AUTOMAÇÃO pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Profa. Dra. ANNA DIVA PLASENCIA LOTUFO  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MENDONÇA DA ROCHA  
Centro de Engenharias e Ciências Exatas / UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ

Ilha Solteira, 18 de janeiro de 2017

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus pela vida e saúde.

Agradecimento mais que especial aos meus pais – meus guerreiros – que sempre me apoiaram nas decisões mais importantes da minha vida me dando forças para seguir em frente e não desistir de buscar pelos meus objetivos.

Agradecimentos ao professor Rubén Augusto Romero Lázaro pela amizade, paciência e principalmente pela orientação durante o desenvolvimento deste trabalho. Ao discente José Nicolás Melchor Gutiérrez pela amizade e o auxílio que muito contribuiu para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do LaPSEE pela amizade, a troca de experiências e culturas e o apoio nas horas de dificuldade. A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica.

Aos amigos que me apoiaram nos vários momentos de dificuldade e se dispuseram a ajudar a contornar os problemas enfrentados com um bom bate papo, orientações, conselhos e principalmente a companhia.

Agradeço a Universidade Estadual Paulista – Unesp.

Ao CNPq pelo apoio financeiro durante o período de desenvolvimento do trabalho.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma ferramenta para otimização de sistema de distribuição que utiliza uma meta-heurística baseada em uma metodologia multipartida para reconfigurar e alocar bancos de capacitores fixos e chaveados para obter a topologia radial que apresente o menor custo de operação. Para encontrar topologias iniciais radiais na reconfiguração do sistema foi aplicado o algoritmo de Prim e com a solução obtida realizou-se um processo de melhoria denominado busca pela vizinhança. O sistema melhorado é submetido a um algoritmo de alocação de bancos de capacitores mostrando que é possível obter uma topologia radial que apresenta mais econômico custo de operação. Como proposta da metodologia multipartida o procedimento é repetido até um critério de parada definido, assim são geradas diversas soluções e a melhor delas será a solução do problema. Todos os programas foram escritos em linguagem C++, e aplicado em sistemas de 69 barras, 84 barras e 135 barras.

**Palavras-chave** – Reconfiguração de sistema. Alocação de bancos de capacitores. Prim. Fluxo de potência ativa. Meta-heurística. Nível de carregamento. Minimizar perdas.

## ABSTRACT

The purpose of this research is to develop a tool for optimization in power system distribution that uses meta-heuristic based on a multi-start methodology to reconfigure and allocate fixed and switched capacitor banks to obtain the radial topology that presents the lowest operating cost. To find initial radial topologies for system reconfiguration, the Prim algorithm was applied and to the current solution an improvement process called “neighborhood search” was performed. The improved system is subjected to a capacitor allocation algorithm showing that it is possible to get a radial topology that presents more economic cost of operation. As a proposal of the multi-start methodology, the procedure is repeated until a desired stop criterion, then several solutions are generated and the best one can be the solution of the problem. All programs were written in C ++ and applied to systems of 69 nodes, 84 nodes and 135 nodes.

**Keywords** – System reconfiguration. Capacitor allocation. Prim. Power flow. Meta-heuristic. Load level. Minimizing losses.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rede de distribuição fracamente malhada.....	22
Figura 2 – Sistema com injeção de corrente nos <i>breakpoints</i> . ....	22
Figura 3 – Equivalente multiporta da rede vista pelos <i>breakpoints</i> . ....	23
Figura 4 – Circuito equivalente Thévenin da rede linear vista pelos <i>breakpoints</i> . ....	23
Figura 5 – Fluxo de carga para sistemas fracamente malhados. ....	26
Figura 6 – Grafo para aplicação do algoritmo de PRIM - Identificação de ramos e barras. ....	31
Figura 7 – Grafo para aplicação do algoritmo de PRIM - 1ª ligação. ....	31
Figura 8 – Grafo para aplicação do algoritmo de PRIM – 2ª ligação.....	32
Figura 9 – Grafo para aplicação do algoritmo de PRIM – 3ª ligação.....	32
Figura 10 – Grafo para aplicação do algoritmo de PRIM – 4ª ligação.....	32
Figura 11 – Grafo para aplicação do algoritmo de PRIM – sistema resultante.....	33
Figura 12 – Sistema radial de 14 barras – ordem original.....	34
Figura 13 – Sistema radial de 14 barras – reordenado. ....	34
Figura 14 – Sistema radial – cálculo da corrente de carga em uma barra $k$ . ....	35
Figura 15 – Sistema radial em um ramo $km$ . ....	36
Figura 16 – Sistema radial – cálculo das tensões – <i>forward</i> . ....	37
Figura 17 – Algoritmo do FP para sistemas radiais.....	39
Figura 18 – Banco de capacitor fixo.....	45
Figura 19 – Banco de capacitor chaveado. ....	45
Figura 20 – Algoritmo do método multipartida.....	48
Figura 21 – Fluxograma geral da metodologia multipartida. ....	49
Figura 22 – Sistema de 14 barras – caso base. ....	51
Figura 23 – Sistema de 14 barras – reconfigurado. ....	53
Figura 24 – Fluxograma do algoritmo de busca pela vizinhança. ....	54
Figura 25 – Sistema de 14 barras – reconfigurado melhorado. ....	56
Figura 26 – Fluxograma de alocação de bancos de capacitores. ....	57
Figura 27 – Fluxograma de retirada de bancos de capacitores.....	59
Figura 28 – Sistema de 14 barras.....	76
Figura 29 – Sistema de 69 barras.....	79
Figura 30 – Sistema de 84 barras.....	83
Figura 31 – Sistema de 136 barras.....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fluxo de potência ativa em cada ramo – sistema de 14 barras.....	52
Tabela 2 – Resultados do sistema de 69 barras – caso base.....	61
Tabela 3 – Sistema 69 barras – barras com menor tensão – caso base.....	62
Tabela 4 – Resultado sistema de 69 barras – reconfigurado. ....	62
Tabela 5 – Sistema 69 barras – barras com menor tensão – reconfigurado. ....	62
Tabela 6 – Resultado sistema de 69 barras – solução final. ....	63
Tabela 7 – Sistema 69 barras – barras com menor tensão – solução final. ....	63
Tabela 8 - Resultados do sistema de 84 barras - caso base. ....	64
Tabela 9 – Sistema 84 barras – barras com menor tensão – caso base.....	64
Tabela 10 – Resultado sistema de 84 barras – reconfigurado. ....	64
Tabela 11 – Sistema 84 barras – barras com menor tensão – reconfigurado. ....	65
Tabela 12 – Resultado sistema de 84 barras – solução final. ....	65
Tabela 13 – Resultado 84 barras – barras com menor tensão – solução final. ....	66
Tabela 14 – Resultados sistema de 136 barras – caso base.....	67
Tabela 15 – Sistema 136 barras – barras com menor tensão – caso base.....	67
Tabela 16 – Resultado sistema de 136 barras – reconfigurado. ....	67
Tabela 17 – Sistema 136 barras – barras com menor tensão – reconfigurado. ....	68
Tabela 18 – Resultado sistema de 136 barras – solução final. ....	68
Tabela 19 – Resultado 136 barras – barras com menor tensão – solução final. ....	69
Tabela 20 – Dados do sistema – 14 barras. ....	75
Tabela 21 – Dados do sistema – 69 barras. ....	77
Tabela 22 – Dados do sistema – 84 barras. ....	80
Tabela 23 – Dados do sistema – 135 barras. ....	84

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RSDEE	Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica
SA	<i>Simulated Annealing</i>
AG	Algoritmo Genético
AGCB	Algoritmo Genético de Chu-Beasley
TS	<i>Tabu Search</i>
GRASP	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>
AHC	Algoritmo Heurístico Construtivo
FC	Fluxo de carga
FP	Fluxo de potência
PNL	Programação não linear
RACSDEE	Reconfiguração e alocação de capacitores em sistema de distribuição de energia elétrica
PCSOIM	Programação cônica de segunda ordem inteira mista
PLIM	Programação linear inteira mista
MST	<i>Minimal spanning tree</i>
RT	Regulador de tensão
FO	Função objetivo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
1.1	OBJETIVO .....	12
1.2	ORGANIZAÇÃO .....	12
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	14
2.1	PUBLICAÇÕES QUE CONSIDERAM APENAS UM NÍVEL DE DEMANDA.....	15
2.1.1	<b>Métodos heurísticos</b> .....	15
2.1.2	<b>Meta-heurísticas</b> .....	17
2.1.3	<b>Otimização Clássica</b> .....	18
2.2	PUBLICAÇÕES QUE CONSIDERAM VÁRIOS NÍVEIS DE DEMANDA.....	19
<b>3</b>	<b>ETAPA PRELIMINAR A APLICAÇÃO DA METODOLOGIA</b> .....	21
3.1	FLUXO DE CARGA PARA SISTEMAS FRACAMENTE MALHADOS .....	21
3.1.1	<b>Cálculo das correntes nos <i>breakpoints</i> – Método de compensação</b> .....	23
3.1.2	<b>Cálculo da matriz de impedância equivalente (<math>Z_{th}</math>) vista pelos <i>breakpoints</i></b> .....	24
3.1.3	<b>Processo iterativo de compensação</b> .....	24
<b>4</b>	<b>RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO</b> .....	27
4.1	MODELO MATEMÁTICO DO PROBLEMA DE RSDEE.....	27
4.2	GERAÇÃO DE SOLUÇÕES INICIAIS .....	29
4.3	ALGORITMO DE PRIM .....	30
4.3.1	<b>Funcionamento do algoritmo de Prim</b> .....	30
4.4	FLUXO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS RADIAIS .....	33
4.4.1	<b>Cálculo da corrente de carga e de ramo</b> .....	35
4.4.2	<b>Cálculo da tensão nas barras</b> .....	37
4.4.3	<b>Cálculo das perdas</b> .....	38
4.4.4	<b>Cálculo da função objetivo</b> .....	38
<b>5</b>	<b>ALOCAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES</b> .....	40
5.1	MODELO MATEMÁTICO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BANCOS.....	40
5.2	CAPACITORES FIXOS E CHAVEADOS .....	44
5.3	GERAÇÃO DE SOLUÇÕES INICIAIS .....	45
5.4	CÁLCULO DA FUNÇÃO OBJETIVO .....	46
<b>6</b>	<b>A METODOLOGIA MULTIPARTIDA</b> .....	47

6.1	A METODOLOGIA MULTIPARTIDA APLICADA NA RECONFIGURAÇÃO E NA ALOCAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS.....	49
6.1.1	Fase inicial.....	50
6.1.2	Fase construtiva.....	52
6.1.3	Fase de melhoria.....	53
6.1.3	Alocação de bancos de capacitores.....	56
6.2	MECANISMO DE PERTURBAÇÃO DE PESOS.....	60
7	TESTES E RESULTADOS.....	61
7.1	SISTEMA DE 69 BARRAS.....	61
7.2	SISTEMA DE 84 BARRAS.....	64
7.3	SISTEMA DE 136 BARRAS.....	67
8	CONCLUSÃO.....	70
	REFERÊNCIAS.....	71
	ANEXO A – DADOS DOS SISTEMAS.....	75
A.1	Sistema de 14 barras.....	75
A.2	Sistema de 69 barras.....	77
A.3	Sistema de 84 barras.....	80
A.4	Sistema de 136 barras.....	84

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da demanda e a crescente expansão do sistema de distribuição de energia comprometeram a qualidade da energia para os consumidores, isto fez com que os órgãos reguladores passassem a avaliar a qualidade do serviço e do produto prestados pelas empresas distribuidoras. No aspecto de qualidade de serviço destacam-se os indicadores de continuidade coletiva (DEC e FEC) e individual (DIC, FIC e DMIC) enquanto na qualidade do produto pode-se destacar a conformidade dos níveis de tensão em regime permanente.

O sistema de distribuição deve operar de forma confiável e econômica, para isto são aplicadas estratégias de chaveamentos que permitem reconfigurar o sistema isolando regiões que apresentem defeitos e assim reduzir o período de desligamentos e perdas de potência ativa. A instalação de bancos de capacitores realiza o controle de potência reativa no sistema contribuindo para melhoria nos níveis de tensão, elevação de fator de potência e redução de perdas na rede principalmente em períodos de alta demanda.

Neste trabalho é abordado o problema de reconfiguração e a alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica com a finalidade de obter uma topologia radial com alocação de bancos de capacitores que apresente custo de operação reduzido. A reconfiguração do sistema de distribuição consiste em modificar a topologia de uma rede radial através da abertura e fechamento de chaves de interconexão estrategicamente instaladas nos ramos do sistema a fim de obter uma topologia radial que reduza as perdas de potência ativa. Simultaneamente é realizada a alocação de bancos de capacitores de acordo com um algoritmo próprio que contribui na redução das perdas de potência nos ramos, aumento do fator de potência e melhora nos níveis de tensão nas barras do sistema analisado.

A reconfiguração com alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição foi analisado por Guimarães (2009) com a aplicação do algoritmo genético. Neste trabalho é proposta a otimização com reconfiguração e alocação de bancos de capacitores com a utilização de uma meta-heurística baseada na metodologia multipartida a qual permite encontrar soluções diversificadas através da repetição do algoritmo no espaço de busca depois que uma região já foi explorada. Desta forma, pode-se continuar explorando o espaço de busca a partir da solução obtida que pode conter um ótimo local e encontrar um ótimo global. A solução inicial é encontrada com a utilização do algoritmo de Prim para gerar uma topologia radial de qualidade que é melhorada pela estratégia de busca local, na sequência é aplicada uma heurística de alocação de bancos de capacitores.

## 1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo obter a configuração radial do sistema de distribuição que apresente o menor custo de operação através da aplicação da metodologia multipartida que realiza simultaneamente a reconfiguração e a alocação de bancos de capacitores considerando três níveis de carregamento no período de análise de um ano.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO

O Capítulo 1 é introdutório e apresenta um breve resumo do que é abordado no trabalho juntamente com o objetivo deste que é trabalhado em cada um dos seguintes capítulos.

O Capítulo 2 faz referência aos trabalhos que serviram de motivação às diversas técnicas de otimização como os primeiros modelos que utilizavam os métodos heurísticos, os modelos matemáticos, até a aplicação de meta-heurísticas como ferramenta de solução de problemas que consideravam apenas um nível ou vários níveis de carregamento.

O Capítulo 3 descreve uma etapa que precede a aplicação da metodologia, onde é resolvido um FC para sistema fracamente malhado para a obtenção do FP ativa em cada ramo que é armazenado no banco de dados e será utilizado pelo algoritmo de Prim como critério de construção de uma topologia radial.

No Capítulo 4 é apresentada a aplicação do algoritmo de Prim na geração de uma solução inicial e o FC para sistemas radiais do qual são obtidas as perdas do sistema nos três níveis de carregamento e o cálculo da FO.

O Capítulo 5 apresenta o procedimento de construção da solução inicial com a utilização de capacitores fixos e chaveados e a avaliação da solução pelo cálculo da FO que considera além das perdas de potência ativa, contabiliza os custos de operação e instalação de bancos de capacitores.

No Capítulo 6 é apresentada a metodologia multipartida e sua aplicação em problema de otimização que realiza simultaneamente a reconfiguração e alocação de bancos de capacitores em sistema de distribuição. A fase de melhoria local que procura melhorar na solução através da busca pela vizinhança e a apresentação de um mecanismo de diversificação de solução.

No Capítulo 7 são apresentados os testes realizados nos sistemas de 69, 84 e 136 barras, no qual são mostradas as melhorias obtidas através da aplicação da metodologia.

E por fim, no Capítulo 8 são apresentadas as conclusões finais do trabalho desenvolvido.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma visão geral das propostas existentes na literatura no que diz respeito ao problema de RSDEE com suas vantagens e desvantagens e, geralmente tem como objetivo minimizar as perdas de potência ativa no sistema.

As publicações que trabalham o problema de RSDEE são classificadas em dois grupos que consideram:

- apenas um nível de demanda;
- vários níveis de demanda.

A otimização de sistemas de distribuição de médio e grande porte não é uma tarefa simples, para isto são empregadas diversas técnicas de otimização tais como: métodos heurísticos, heurísticas modernas (ou meta-heurísticas) e métodos exatos.

Basicamente as heurísticas propõem:

- i.* utilizando um índice de sensibilidade, partir de uma configuração malhada e a cada passo abrir uma chave do sistema até obter uma configuração radial;
- ii.* partir de uma configuração radial realizar troca de ramos (conectando um ramo e desconectando outro) até que não haja melhoria da solução, sempre mantendo a radialidade;
- iii.* utilizando um índice de sensibilidade, partir de uma configuração na qual todas as chaves estão abertas e fechar uma chave a cada passo até que seja obtida uma configuração radial.

Estas heurísticas foram bastante empregadas na solução de problemas de RSDEE. Mesmo que apresentem soluções de boa qualidade em tempos bastante baixos, as soluções encontradas ficam presas no primeiro ótimo encontrado.

Desta forma, as heurísticas tornaram-se mais sofisticadas, e as meta-heurísticas passaram a ser empregadas na solução de RSDEE, nas quais as principais utilizadas foram: *Simulated Annealing* (SA), Algoritmo Genético (AG), Algoritmo Genético de Chu-Beasley (AGCB), Busca Tabu (TS, do inglês *Tabu Search*), *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP).

Existem também trabalhos que propõem o uso de modelos matemáticos para o problema de RSDEE que são resolvidos com a aplicação de métodos exatos, como o algoritmo de *Branch and Bound*.

## 2.1 PUBLICAÇÕES QUE CONSIDERAM APENAS UM NÍVEL DE DEMANDA

Esta seção descreve os métodos de solução do problema de RSDEE classificados de acordo com a técnica utilizada. Inicialmente são apresentados os trabalhos baseados em métodos heurísticos, seguido pelos que utilizam meta-heurísticas e finalmente os que propõem modelos aproximados ou relaxados, para serem resolvidos utilizando-se técnicas exatas.

### 2.1.1 Métodos heurísticos

As heurísticas são procedimentos de busca de uma solução global, mas para obtê-la são necessárias diversificações durante seu desenvolvimento para sair de ótimos locais e explorar regiões que possam conter ótimos globais.

Merlin e Back (1975) foram os pioneiros no tema de RSDEE com a proposta de alterar a topologia de uma rede de distribuição de modo a obter uma configuração que minimize as perdas. No trabalho são utilizadas duas metodologias: uma heurística construtiva e um algoritmo de otimização clássica. O método heurístico parte de uma configuração onde todas as chaves estão fechadas e a cada passo é calculado um FC e a chave a ser aberta é aquela cujo ramo conduz menor valor de corrente e preserve o sistema conexo. O processo é repetido até que uma configuração radial seja obtida. Os autores afirmam que a abertura do ramo que conduz o menor fluxo de corrente perturba o mínimo possível a distribuição do fluxo nos demais ramos do sistema, mantendo a característica de perdas reduzidas da configuração malhada. Na segunda metodologia é aplicado o algoritmo *Branch and Bound*, que utiliza as perdas da configuração totalmente malhada como limitante inferior e as perdas correspondentes a configuração radial da heurística descrita anteriormente como limitante superior. O método heurístico apresenta pequeno esforço computacional comparado ao algoritmo *Branch and Bound* para sistemas de grande porte.

Civanlar et al. (1988) propôs o método de troca de ramos. Ao contrário da proposta de Merlin e Back (1975) este método parte de uma configuração radial onde são realizadas trocas entre um ramo ligado e um desligado, sempre mantendo a radialidade. A variação das

perdas é estimada utilizando-se uma fórmula aproximada que fornece a melhor chave a ser fechada ou aberta que diminui as perdas no sistema.

Considerando redução de perdas Shirmohammadi e Hong (1989) propõem um algoritmo heurístico construtivo (AHC) que parte de uma rede malhada e em cada etapa é calculado um fluxo de carga para sistema fracamente malhado e a chave a ser aberta será aquela que está no ramo cujo fluxo de corrente é mínimo e mantém a rede conexa. É uma proposta semelhante à de Merlin e Back (1975), mas passa a considerar as restrições de nível de tensão nas barras e de fluxo de corrente nos ramos, o que significa que se a abertura de uma chave violar as restrições de tensão e corrente, esta chave deve ser fechada e a chave cujo ramo conduz o menor valor de fluxo de corrente é aberta. Esta operação é repetida até que não ocorra violação das restrições.

A proposta de Baran e Wu (1989a) para a RSDEE é baseada na metodologia de Civanlar et al. (1988) e leva em conta tanto a redução das perdas quanto o balanceamento de cargas. Com esta proposta os autores apresentam um mecanismo que reduz a quantidade de candidatos a participar das trocas de ramos considerando que, ao analisar um laço, a troca de um ramo aberto com os que estão fechados e são adjacentes a ele levar a um aumento das perdas, as outras possíveis trocas de ramos no laço também levarão a um aumento das perdas, não precisando ser analisadas.

Goswami e Basu (1992) propõem uma heurística baseada em um melhoramento do algoritmo proposto por Shirmohammadi e Hong (1989). Nesta heurística, considera-se a formação de um laço por vez, assim o algoritmo fecha uma chave por vez introduzindo uma malha no sistema e abre uma chave no laço, voltando para a configuração radial. Assim, é calculado o fluxo de potência para sistema radial e o ramo com menor fluxo de potência é retirado do sistema. O procedimento é repetido até percorrer todos os laços do sistema.

Gomes et al. (2005) apresentam uma heurística que acontece em duas etapas. Na primeira etapa, parte-se de uma configuração malhada uma chave de interconexão é aberta a cada passo até se obter uma configuração radial. Dentre as possibilidades, a chave a ser aberta é aquela que leva ao menor incremento da função objetivo (redução das perdas). A segunda etapa consiste em reduzir as perdas obtidas pela fase construtiva através da troca de ramos.

### 2.1.2 Meta-heurísticas

As meta-heurísticas são técnicas de solução que gerenciam uma interação entre as estratégias de busca local e as técnicas de nível superior para criar um processo de otimização com a capacidade de sair de soluções ótimas locais e realizar uma busca mais robusta no espaço de busca a fim de encontrar um ótimo global.

Considerando tanto o problema de redução de perdas quanto o do balanceamento de cargas, Chiang e Jean-Jumeau (1990a) apresentaram uma formulação multi-objetivo na qual o número de operações de chaveamento é colocado como restrição do problema de RSDEE. Para resolver este problema é utilizado um método de dois estágios baseado na meta-heurística de SA e o método de  $\varepsilon$ -restrição para otimização multi-objetivo.

Em Nara et al. (1992), foi proposto o primeiro algoritmo de redução de perdas baseado no Algoritmo Genético (AG). Neste método a codificação é feita através de uma representação binária. Um dos principais pontos fracos deste método é devido à codificação que permite o aparecimento de configurações não radiais (com malhas e com barras ilhadas) após o operador de recombinação. Além disto, a metodologia considera um cálculo aproximado da função *fitness*.

Mendoza et al. (2006) apresenta uma metodologia que melhora a eficiência do AG aplicado ao problema de RSDEE. Considerando-se que seja factível a população inicial criada levando-se em conta os laços fundamentais do grafo e os operadores genéticos de recombinação e mutação. Desta forma, o espaço de busca é reduzido e os indivíduos gerados pelo algoritmo, em sua maioria, são factíveis em relação à topologia radial e às restrições de operação. Este trabalho representa uma melhoria em relação ao de Nara et al. (1992) que não controla de forma implícita a restrição de radialidade.

Carreño, Romero e Padilha-Feltrin (2008) propõem um algoritmo genético de Chu-Beasley (AGCB). O algoritmo utiliza um operador de recombinação que garante gerar somente soluções factíveis, reduzindo o espaço de busca apresentando desempenho melhor que as propostas de Nara et al. (1992) e Mendoza et al. (2007).

Em Oliveira (2011) as perdas ativas são reduzidas com a utilização da meta-heurística GRASP. Neste método, inicialmente as chaves de interconexão estão fechadas, e a cada iteração da fase construtiva é resolvido um problema de FC para calcular o ponto de operação do sistema. Assim um ramo é desligado por vez até obter uma configuração radial.

O algoritmo também verifica se o sistema é desconexo contendo ilhas ou um sistema radial conexo.

Franco et al. (2012) apresentam um algoritmo de TS para o problema de RSDEE para minimização de perdas no qual a solução inicial é gerada aleatoriamente com o uso do algoritmo de Prim. A função objetivo é estimada pela fórmula aproximada de Baran e Wu (1989). Somente é calculado o ponto de operação exato para a melhor solução de uma vizinhança o que torna muito rápida a metodologia.

Souza (2013) apresenta uma metodologia na qual é utilizada a meta-heurística GRASP considerando redução das perdas. Para a aplicação da metodologia, admite-se que todas as chaves estão abertas e a cada passo uma chave é fechada de acordo com um índice de sensibilidade obtido através da solução de um PNL, em que as variáveis binárias, correspondente à operação das chaves, são relaxadas.

Eldurssi e O'Connell (2015) apresentaram um AG com mutação guiada para problema de RSDEE multi-objetivo com a finalidade de minimizar perdas e número de chaveamentos e assim melhorar os níveis de tensão.

### **2.1.3 Otimização Clássica**

Glamocanin (1990) utiliza o método Simplex para resolver o problema de reconfiguração como um problema de transporte com custos quadráticos, o qual parte de uma configuração inicial obtida com a linearização das perdas e utiliza o Simplex para melhorá-la.

Jabr, Singh e Pal (2012) propõem dois modelos para resolver o problema de reconfiguração. O primeiro consiste em um modelo convexo de programação cônica de segunda ordem inteira mista (PCSOIM), o segundo um modelo de programação linear inteira mista (PLIM). Os modelos foram testados utilizando *solvers* comerciais e os autores compararam os resultados verificando que o modelo de PCSOIM é mais rápido que o PLIM na obtenção de uma solução factível, sendo mais apropriado para aplicações em tempo real. O modelo de PLIM é capaz de encontrar melhores soluções para sistemas de grande porte com um tempo computacional mais elevado, sendo mais adequado para aplicações de planejamento.

Borges, Franco e Rider (2013) desenvolveram um modelo de PLIM com restrições de cerca, para minimizar perdas em problema de RSDEE. A metodologia foi testada em

sistemas de grande porte, encontrando soluções iguais ou de melhor qualidade que as disponíveis na literatura.

Nesta seção foram apresentados trabalhos que consideram apenas um nível de demanda, ou seja, encontrar a topologia da rede que minimiza as perdas na qual as cargas não variam, geralmente considera-se a demanda de pico em cada barra. Entretanto, o sistema elétrico real não se comporta desta forma, as cargas variam com o tempo.

A seguir serão apresentados trabalhos que consideram o problema de RSDEE que opera com demanda variável, aproximando-se de uma situação real do problema.

## 2.2 PUBLICAÇÕES QUE CONSIDERAM VÁRIOS NÍVEIS DE DEMANDA

Lee e Brooks (1988) foram pioneiros a trabalharem no problema de RSDEE com vários níveis de demanda com alocação de bancos de capacitores. Verificou-se ser vantajoso alterar a configuração da rede quando ocorrem variações significativas na rede.

López et al. (2004) comparam os resultados obtidos para o problema de RSDEE considerando reconfiguração de hora em hora e apenas um único nível de demanda. Os resultados mostram que a reconfiguração horária não é eficiente, pois muitas operações de chaveamento são realizadas para cada nível de demanda.

Bueno (2005) utiliza topologia única para todo o período de operação apresentando duas heurísticas. Uma baseada no método de abertura sequencial de chaves e a outra baseada no algoritmo de Kruskal. Também propõe uma busca local com a troca de ramos e aplicação de um algoritmo GRASP para resolver o problema. São considerados períodos de duração de três horas para cada nível de demanda, apresentando oito níveis de demanda diários.

Amasifen, Romero e Mantovani (2005) propõem um algoritmo evolutivo para o problema de RSDEE com demanda variável e topologia de operação única. A população inicial é obtida de algoritmos heurísticos construtivos (Prim e Kruskal). Foram utilizados os parâmetros elétricos da rede (resistência, reatância e módulo da impedância) como peso dos ramos, além de considerar três níveis de demanda.

Guimarães (2009) propôs a utilização de um único algoritmo genético para realizar a reconfiguração e a alocação de banco de capacitores. O algoritmo desenvolvido considera três níveis de carregamento com horizonte de estudo de um ano. Neste trabalho a otimização é realizada em duas etapas, a primeira consiste na reconfiguração, a alocação de capacitores fixos e automáticos e o ajuste de tap dos transformadores em três níveis de carga (leve, médio

e pesado). Na segunda etapa, a melhor configuração é utilizada por um algoritmo de SA para apresentar alternativas para as posições de tap do transformador da subestação em conjunto com os taps dos capacitores automáticos alocados nas barras.

A alocação de capacitores em sistemas de distribuição é abordada por muitas propostas existentes na literatura especializada. Entretanto, a seguir apresentam-se alguns destes trabalhos.

Baran e Wu (1989b) propuseram uma metodologia de resolução do problema de alocação de capacitores em sistemas radiais com o objetivo de reduzir perdas de potência ativa principalmente em horário de pico, mantendo mínimo o custo de aquisição dos capacitores. Esta metodologia é trabalhada em dois níveis: o primeiro nível chamado de *mestre* é utilizado para alocar os capacitores determinando a quantidade e a localização, enquanto que o segundo nível chamado de *escravo* é utilizado como subrotina pelo *mestre* para determinar o tipo e o tamanho dos capacitores alocados.

Chiang e Jumeau (1990b) propuseram uma formulação que considera os aspectos práticos e as restrições de carga em diversos níveis, abordando o problema de alocação de capacitores aplicando um algoritmo SA.

Jiang e Baldick (1996) utilizaram SA para reconfiguração e controle de capacitores automáticos com objetivo de minimizar perdas. Este trabalho considerou duas abordagens: 1- realizar o controle dos capacitores de forma simultânea com a reconfiguração (*full search*); 2- realizar a reconfiguração e depois encontrar o controle ótimo para os capacitores nesta configuração (*quick search*). Também realizou uma abordagem intermediária onde é feito o controle dos capacitores a cada iteração do algoritmo de reconfiguração (*feasible search*).

Farahani et al. (2012) propuseram um AG para resolver o problema de reconfiguração e alocação de bancos de capacitores nos sistemas de distribuição. A função objetivo minimiza o custo total da alocação dos bancos de capacitores e as perdas de energia durante o horizonte de planejamento considerando as restrições de magnitude de tensão nos nós e capacidade de corrente nos ramos.

### 3 ETAPA PRELIMINAR A APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

As redes de distribuição são malhadas, mas são operadas de forma radial e a utilização de chaves de interconexão normalmente abertas garantem a topologia radial. A fase inicial da metodologia apresenta uma etapa preliminar. Na etapa preliminar são realizados dois procedimentos necessários para o desenvolvimento das etapas futuras da metodologia.

Um procedimento é o cálculo da FO do sistema radial na configuração base (não reconfigurada e sem alocação de bancos). Para isto é necessário resolver o problema de fluxo de carga radial para cada nível de carregamento (leve, médio e pesado) que fornece as perdas de potência ativa em cada nível e é utilizada para o cálculo da FO para este sistema considerando os três níveis de carregamento, o tempo de operação de um ano para cada nível de carregamento e o custo da energia.

O outro procedimento consiste no fechamento das chaves normalmente abertas do caso base configurando um sistema malhado e desta forma resolver um FC para o sistema malhado com demanda normal. Neste caso é usado o FC especializado para sistemas fracamente malhados, sendo assim são calculados os FP ativa em cada ramo, chamados de “pesos ideais”, e que são utilizados pelo algoritmo de Prim como critério de construção da árvore geradora.

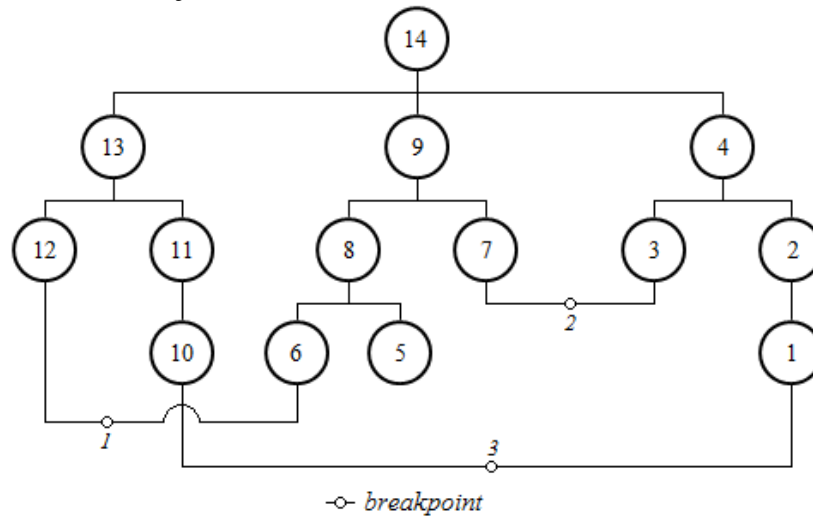
#### 3.1 FLUXO DE CARGA PARA SISTEMAS FRACAMENTE MALHADOS

Com o fechamento das chaves de interconexão do caso base, tem-se um sistema malhado sobre o qual é resolvido um FC para sistema fracamente malhado para a obtenção do FP ativa em cada ramo do sistema. Os FP ativa calculados são chamados de “pesos ideais” e armazenados no banco de dados. Para resolver o FC é necessário conhecer a carga da barra, a impedância dos ramos e a potência do sistema.

A rede de distribuição malhada mostrada pela Figura 1 é composta por 3 laços, porém o algoritmo de varredura não pode ser aplicado diretamente em um sistema malhado, sendo necessário transformá-lo em um sistema radial.

O primeiro passo para transformar um sistema malhado em radial é seccionar os ramos que formam malha, transformando-os em nós fictícios chamados *breakpoints*.

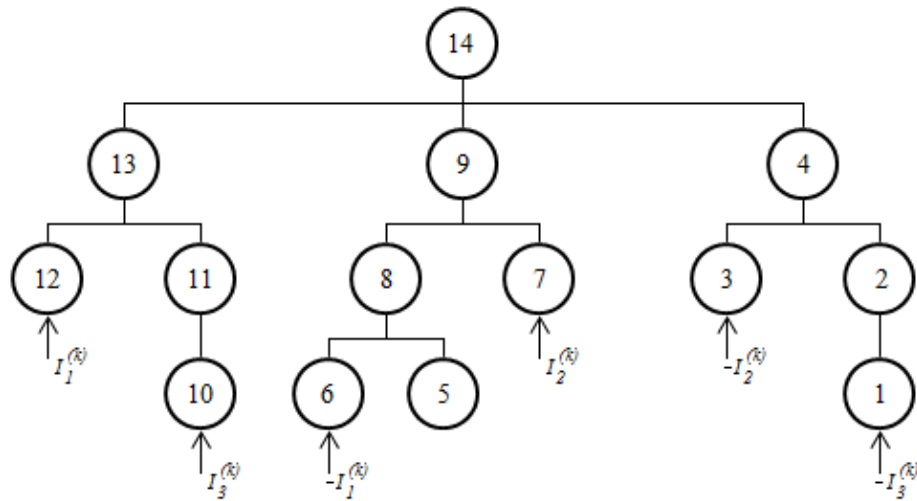
Figura 1 – Rede de distribuição fracamente malhada.



Fonte – Próprio autor.

Os *breakpoints* podem ser substituídos por injeção de corrente com polaridade oposta em ambos os nós terminais dos ramos seccionados conforme ilustrado na Figura 2. Neste sistema radial resultante é aplicado o FC de sistema radial *backward/forward sweep* desenvolvido por (SHIRMOHAMMADI et al., 1988).

Figura 2 – Sistema com injeção de corrente nos *breakpoints*.



Fonte: próprio autor.

Para a iteração  $k$  a aplicação do algoritmo de FP em um *breakpoint*  $j$ , a corrente  $I_j^{(k)}$  injetada nos nós terminais  $j1$  e  $j2$  dos  $p$  *breakpoint* são mostradas em (1) e (2).

$$I_{j1}^{(k)} = -I_j^{(k)} \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (1)$$

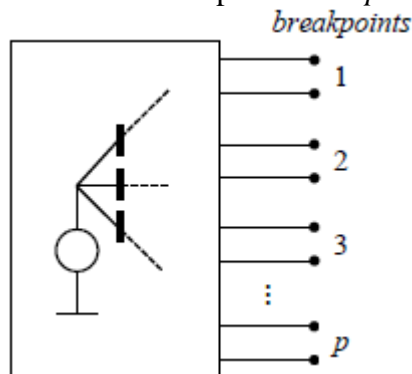
$$I_{j2}^{(k)} = I_j^{(k)} \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

As correntes injetadas são somadas às correntes nodais e aplicadas no método de varredura *backward/forward sweep* (SHIRMOHAMMADI, et al., 1988).

### 3.1.1 Cálculo das correntes nos *breakpoints* – Método de compensação

As correntes nos *breakpoints* são calculadas pelo método de compensação de Tinney (1972). Com a abertura dos *breakpoints*, o sistema radial resultante é analisado como um circuito multiporta conforme ilustrado na Figura 3 onde as portas do circuito são formadas pelos nós dos *breakpoints*. Para o cálculo das correntes nos *breakpoints* é necessário que seja montado o circuito multiporta.

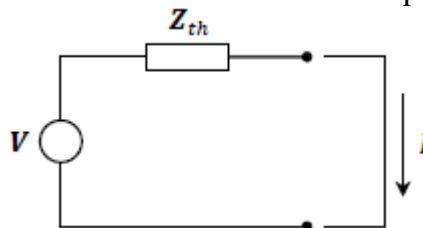
Figura 3 – Equivalente multiporta da rede vista pelos *breakpoints*.



Fonte: Shirmohammadi et al. (1988).

Em uma rede linear o equivalente multiporta corresponde a um circuito equivalente de Thévenin da rede radial visto pelos *breakpoints* conforme a Figura 4 onde a tensão de Thévenin ( $V_{th}$ ) é um vetor  $[V]_{p \times 1}$  formado pelas tensões de circuito aberto nos *breakpoints* obtido pelo *FC* no sistema radial. A impedância equivalente de Thévenin ( $Z_{th}$ ) é uma matriz  $[Z]_{p \times p}$  com as impedâncias vistas pelos *breakpoints* e  $I$  é um vetor  $[I]_{p \times 1}$  com as correntes de breakpoints a serem calculadas pela equação (3).

Figura 4 – Circuito equivalente Thévenin da rede linear vista pelos *breakpoints*.



Fonte: Shirmohammadi et al. (1988).

$$V = Z_{th} I \quad (3)$$

### 3.1.2 Cálculo da matriz de impedância equivalente ( $Z_{th}$ ) vista pelos *breakpoints*

A matriz de impedância equivalente é obtida utilizando a equação (3) na forma matricial (4), baseada no método a seguir.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \vdots \\ \dot{V}_j \\ \vdots \\ \dot{V}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{11} & \cdots & \bar{Z}_{1j} & \cdots & \bar{Z}_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{Z}_{j1} & \cdots & \bar{Z}_{jj} & \cdots & \bar{Z}_{jp} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{Z}_{p1} & \cdots & \bar{Z}_{pj} & \cdots & \bar{Z}_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_j \\ \vdots \\ \dot{I}_p \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde:  $\bar{Z}_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$

De acordo com (4), supondo que seja inserida no  $j$ -ésimo *breakpoint* uma corrente  $\dot{I}_j = 1 + j0$  pu e nos demais *breakpoints* uma corrente  $\dot{I}_i = 0$  (para  $i = 1, 2, \dots, p$  e  $i \neq j$ ), a matriz de impedâncias vista pelos *breakpoints* será igual a matriz de tensão nos *breakpoints*, o que seria correspondente a aplicar uma corrente de 1 pu no *breakpoint*  $j$  com polaridades opostas. Na ausência de cargas, a solução do problema de fluxo de carga para redes radiais pode ser alcançada em uma única iteração. Cada uma das tensões nos *breakpoints* pode ser determinada subtraindo-se as tensões nos dois terminais de cada *breakpoint*. Este processo é repetido para todos os *breakpoints*, até que todas as colunas da matriz de impedância equivalente ( $Z_{th}$ ) sejam preenchidas (SHIRMOHAMMADI et al., 1988).

### 3.1.3 Processo iterativo de compensação

O processo iterativo de compensação (SHIRMOHAMMADI et al., 1988), para calcular as correntes nos *breakpoints*, usando o circuito equivalente de Thévenin da Figura 4 é apresentado a seguir:

1. Calcular as impedâncias equivalentes dos *breakpoints* e montar a matriz equivalente de Thévenin ( $Z_{th}$ ), mantendo-a constante durante todo o processo de compensação;
2. Calcular a tensão equivalente de Thévenin (vetor de tensões nos *breakpoints*,  $V$ ) da rede radial através dos processos *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  $k$  do processo de compensação, a mudança incremental das correntes nos *breakpoints* é dada por (5),

$$\Delta I^{(k)} = Z_{th}^{-1} V^{(k)} \quad (5)$$

A equação (5) pode ser escrita na forma (6).

$$\begin{bmatrix} \Delta I_r^{(k)} \\ \Delta I_m^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{th}^r & -Z_{th}^m \\ Z_{th}^m & Z_{th}^r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta V_r^{(k)} \\ \Delta V_m^{(k)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde:

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

4. Atualizar as correntes nos *breakpoints* de acordo com (7).

$$I^{(k)} = I^{(k-1)} + \Delta I^{(k)} \quad (7)$$

A equação (7) pode ser escrita na forma (8).

$$\begin{bmatrix} I_r^{(k)} \\ I_m^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_r^{(k-1)} \\ I_m^{(k-1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta I_r^{(k)} \\ \Delta I_m^{(k)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

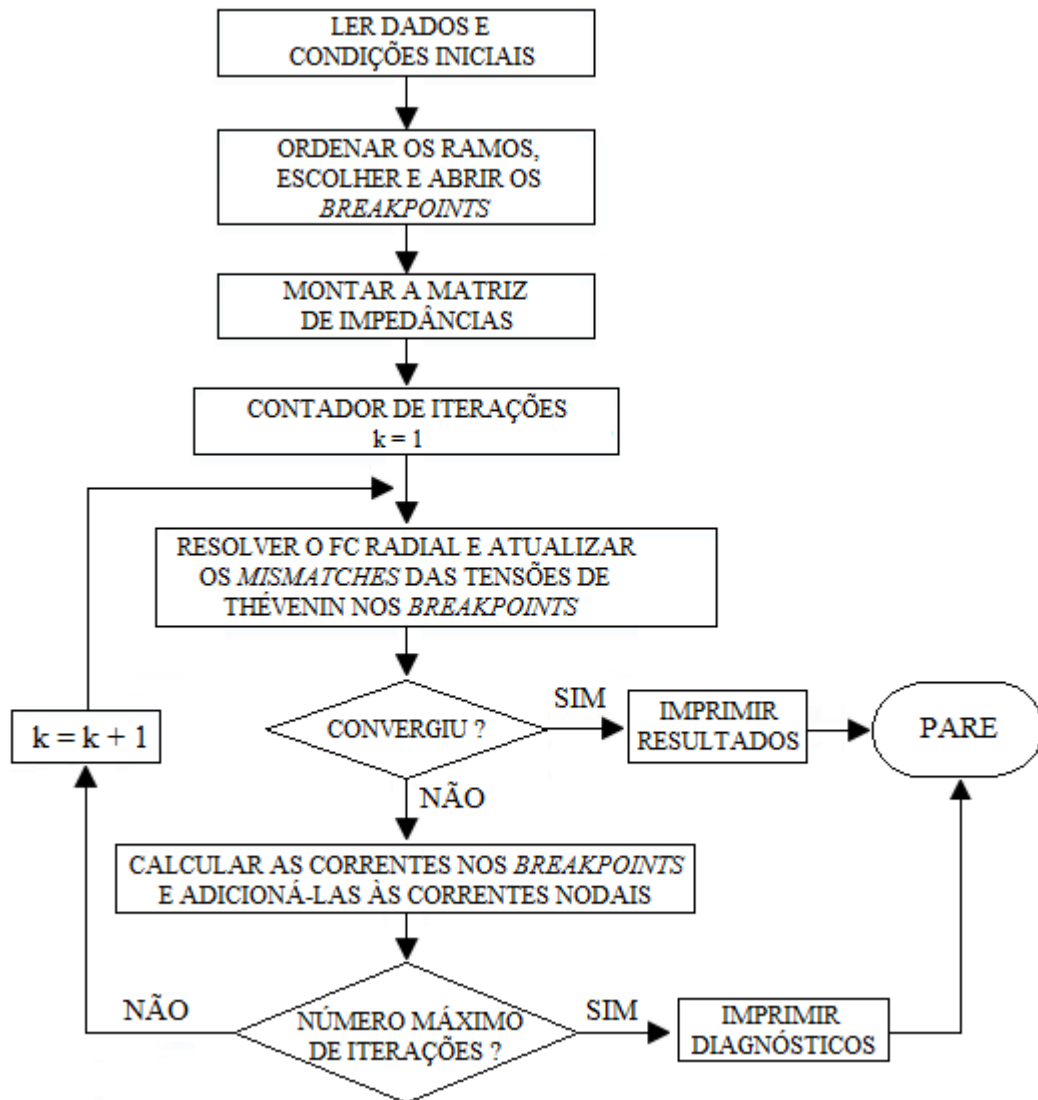
onde:

$I_r^{(k)}$  e  $I_m^{(k)}$  são os vetores com as partes real e imaginária do vetor  $I^{(k)}$ , respectivamente;

5. Repetir os passos (2), (3) e (4) até alcançar a convergência desejada (a máxima tensão nos *breakpoints* calculada no passo (2), e deve estar dentro do limite especificado:  $\max |\Delta V^{(k)}| < \varepsilon$ ).

Na Figura 5 mostra-se o fluxograma do método de cálculo do FC para sistemas fracamente malhados.

Figura 5 – Fluxo de carga para sistemas fracamente malhados.



Fonte: Shirmohammadi et al. (1988).

## 4 RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

O sistema de distribuição apesar de possuir estrutura malhada é operado de forma radial. A reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica é a modificação da topologia da rede radial através da abertura e o fechamento de chaves de interconexão que são estrategicamente instaladas para alterar a topologia da rede com a finalidade de isolar regiões que apresentam defeitos, balancear as cargas nos alimentadores através da transferência de carga das barras mais carregadas para as mais aliviadas e encontrar uma topologia radial que minimize as perdas de potência ativa no sistema. As chaves de interconexão realizam o desligamento de ramos energizados e o ligamento dos ramos desenergizados transformando uma topologia radial em outra sem apresentar ilhamento.

A abertura de ramos bem como a troca devem satisfazer as seguintes restrições:

- os limites de tensão nas barras do sistema;
- a capacidade de corrente nos alimentadores;
- as duas leis de Kirchhoff sistematizadas através do fluxo de carga;
- a radialidade do sistema.

A topologia radial é adotada devido à redução das correntes de curto circuito, desta forma também contribuem para reduzir os custos com equipamentos de proteção.

A complexidade do problema está diretamente relacionada à quantidade de chaves de interconexão fazendo com que a quantidade de operações cresça de maneira considerável e se transforme em uma explosão combinatória sujeita às restrições de operação e radialidade. Desta forma, para a resolução do problema são empregadas técnicas de solução como a utilização de algoritmos heurísticos e meta-heurísticos, bastante empregados em pesquisas na área de sistemas elétricos de potência.

### 4.1 MODELO MATEMÁTICO DO PROBLEMA DE RSDEE

O modelo matemático de Franco et al. (2012) do problema de RSDEE para minimizar o custo das perdas em sistemas radiais considerando três níveis de carregamento é mostrado em (9)-(15):

$$\min v = \sum_{d \in \Omega_d} \sum c_d^{ls} \Delta_d \left[ G_{ij} x_{ij} (V_{i,d}^2 + V_{j,d}^2 - 2V_{i,d} V_{j,d} \cos \theta_{ij,d}) \right] \quad (9)$$

sujeito a:

$$P_{i,d}^S - P_{i,d}^D - \sum_{j \in \Omega_{b_i}} x_{i,j} P_{ij,d} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (10)$$

$$Q_{i,d}^S - Q_{i,d}^D - \sum_{j \in \Omega_{b_i}} x_{i,j} Q_{ij,d} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (11)$$

$$\underline{V} \leq V_{i,d} \leq \bar{V} \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (12)$$

$$I_{r_{ij,d}}^2 + I_{m_{ij,d}}^2 \leq x_{ij} \bar{I}_{ij}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (13)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_l} x_{ij} = nb - 1 \quad (14)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (15)$$

onde

- $v$  função objetivo que representa o custo total das perdas ativas
- $c_d^{ls}$  é o custo das perdas no nível de demanda  $d$
- $\Delta_d$  período de duração do nível de demanda  $d$
- $G_{ij}$  condutância do ramo  $ij$
- $x_{ij}$  posição da chave do ramo  $ij$ , de natureza binária (0 – desligado, 1 – ligado)
- $V_{i,d}$  módulo da tensão na barra  $i$ , no nível de demanda  $d$
- $V_{j,d}$  módulo da tensão na barra  $j$ , no nível de demanda  $d$
- $\theta_{ij,d}$  diferença angular entre as tensões das barras  $ij$  no nível de demanda  $d$
- $P_{i,d}^D$  e  $Q_{i,d}^D$  demandas ativa e reativa na barra  $i$ , no nível de demanda  $d$
- $P_{i,d}^S$  e  $Q_{i,d}^S$  potência ativa e reativa fornecida pela subestação na barra  $i$  no nível de demanda  $d$
- $P_{ij,d}$  e  $Q_{ij,d}$  fluxo de potência ativa e reativa pelo ramo  $ij$  no nível de demanda  $d$
- $\underline{V}$  e  $\bar{V}$  limite inferior e superior do módulo da tensão nas barras
- $I_{r_{ij,d}}$  e  $I_{m_{ij,d}}$  componentes real e imaginária da corrente no ramo  $ij$  no nível de demanda  $d$
- $\bar{I}_{ij}$  fluxo máximo de corrente permitido no ramo  $ij$
- $nb$  número de barras do sistema
- $\Omega_l$  conjunto de ramos do sistema de distribuição
- $\Omega_d$  conjunto dos níveis de demanda
- $\Omega_b$  conjunto de barras do sistema de distribuição
- $\Omega_{b_i}$  conjunto de barras conectadas à barra  $i$

As restrições (10) e (11) representam o balanço de potência ativa e reativa, respectivamente, (12) representa os níveis do módulo de tensão em cada barra do sistema, (13) é a restrição de corrente máxima nos ramos, (14) é a condição necessária para radialidade do sistema, (15) indica a posição das chaves aberto/fechado.

De acordo com Lavorato et al. (2012), se as demandas em todas as barras de carga forem diferentes de zero, as restrições (10) e (11), juntamente com (14), garantem uma solução radial do problema.

Nas equações (10) e (11),  $P_{ij,d}$  e  $Q_{ij,d}$  são obtidas pela aplicação da lei de tensões de Kirchhoff, e assumem a forma:

$$P_{ij,d} = V_{i,d}^2 G_{ij} - V_{i,d} V_{j,d} (G_{ij} \cos \theta_{ij,d} + B_{ij} \text{sen} \theta_{ij,d}) \quad (16)$$

$$Q_{ij,d} = -V_{i,d}^2 B_{ij} - V_{i,d} V_{j,d} (G_{ij} \text{sen} \theta_{ij,d} - B_{ij} \cos \theta_{ij,d}) \quad (17)$$

As componentes real e imaginária de fluxo de corrente no ramo  $ij$  apresentada em (13) é obtida por (18) e (19):

$$I_{r_{ij,d}} = G_{ij} (V_{i,d} \cos \theta_{i,d} - V_{j,d} \cos \theta_{j,d}) - B_{ij} (V_{i,d} \text{sen} \theta_{i,d} - V_{j,d} \text{sen} \theta_{j,d}) \quad (18)$$

$$I_{m_{ij,d}} = G_{ij} (V_{i,d} \text{sen} \theta_{i,d} - V_{j,d} \text{sen} \theta_{j,d}) + B_{ij} (V_{i,d} \cos \theta_{i,d} - V_{j,d} \cos \theta_{j,d}) \quad (19)$$

onde:

$B_{ij}$  é a susceptância do condutor entre as barras  $i$  e  $j$ .

Um ponto importante a destacar é que a rede a ser reconfigurada está operando e a restrição (13) deve ser atendida pela topologia corrente, e como o objetivo é reduzir as perdas através da reconfiguração do sistema, as correntes nos condutores devem diminuir por isso os trabalhos sobre RSDEE para minimizar perdas não consideram a restrição de limite de corrente. Além disto, as capacidades das subestações não são consideradas, portanto podem ser interconectadas formando uma única barra.

## 4.2 GERAÇÃO DE SOLUÇÕES INICIAIS

A partir do FC para sistemas fracamente malhados são obtidos os FP ativa em todos os ramos do sistema. Estes FP ativa são chamados de pesos e utilizados pelo o algoritmo de Prim, para gerar a árvore geradora máxima. Desta forma os ramos com maior FP tendem a permanecer na solução, e gerar uma solução factível, ou seja, um sistema radial.

Com o sistema reconfigurado, a qualidade da solução radial obtida é verificada pelo cálculo da FO, para isto é necessário conhecer as perdas de potência ativa em cada nível de carregamento obtido pela aplicação do FP para sistemas radiais. As perdas de potência ativa nos ramos, o tempo de operação e o custo da energia são parâmetros para o cálculo da FO.

De acordo com o objetivo deste trabalho que tem como finalidade realizar a otimização de sistema de distribuição radial através da reconfiguração e a alocação de bancos de capacitores, tem-se até o momento a solução reconfigurada sobre a qual será aplicada o algoritmo de alocação de banco de capacitores.

#### 4.3 ALGORITMO DE PRIM

Proposto pelo matemático Vojtech Jarník em 1930 e desenvolvido por Robert Clay Prim em 1957, o algoritmo de Prim é um algoritmo exato utilizado para encontrar uma árvore geradora mínima (*minimal spanning tree - MST*) em um grafo conexo, não direcionado onde as arestas possuem valores numéricos definidos como pesos.

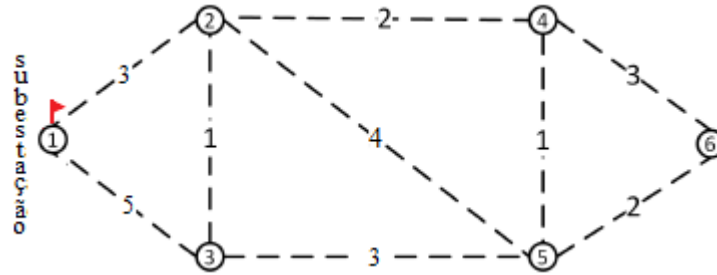
Na construção da árvore geradora mínima, o algoritmo de Prim sempre encontra uma solução ótima e tem como ponto de partida a escolha de um vértice qualquer no grafo original que é incrementado de acordo com os pesos definidos às arestas. A aresta com menor peso é introduzida na solução, interligando os vértices de modo que a soma das arestas seja mínima e mantenha a árvore acíclica e conexa.

Em problemas de RSDEE o algoritmo de Prim é utilizado na obtenção da árvore geradora máxima que corresponde a uma topologia radial com perdas mínimas. As arestas passam a ser chamadas de ramos e o FP através destes ramos é definido como peso. Assim, o ramo com maior peso é o candidato mais forte a permanecer na solução.

##### 4.3.1 Funcionamento do algoritmo de Prim

Uma maneira de apresentar o funcionamento do algoritmo de Prim em problemas de RSDEE é assumir um sistema (grafo) conforme a Figura 6 onde os vértices representam as barras enquanto as linhas tracejadas representam os ramos do sistema com seus respectivos pesos e que inicialmente estão todos abertos.

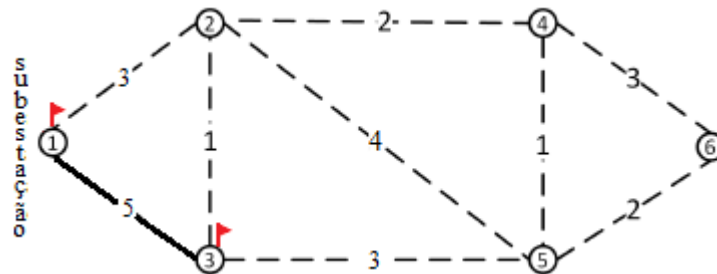
Figura 6 – Grafo para aplicação do algoritmo de PRIM - Identificação de ramos e barras.



Fonte: próprio autor.

Como ponto de partida é escolhida uma barra de referência, no caso é indicada a barra 1 (subestação). Em seguida, são identificados os ramos ligados à barra 1 (1-2 e 1-3) cujos pesos são indicados por 3 e 5 respectivamente. Por estar em etapa inicial não há ramo que possa gerar laço, desta forma o ramo de maior peso (1-3) é selecionado e a barra 3 é marcada conforme representado na Figura 7.

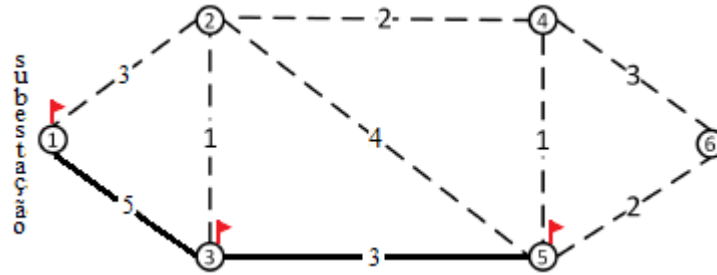
Figura 7 – Grafo para aplicação do algoritmo de PRIM - 1ª ligação.



Fonte: próprio autor.

Marcadas as barras 1 e 3, são listadas as possibilidades de ligação. A barra 1 tem como opção o ramo 1-2 com peso 3 e a barra 3 com os ramos 3-2 e 3-5 com pesos 1 e 3 respectivamente. Entre as possibilidades de ligação, será escolhido o ramo de maior peso e que não forme laço. Nota-se que existem dois ramos que satisfazem a condição de maior peso (1-2 e 3-5, ambas com peso 3), sendo necessário definir um critério de desempate o qual será escolhido o ramo conectado à última barra analisada, como a barra 3 foi a última analisada, o ramo 3-5 é ligado e a barra 5 é marcada, como mostrado na Figura 8.

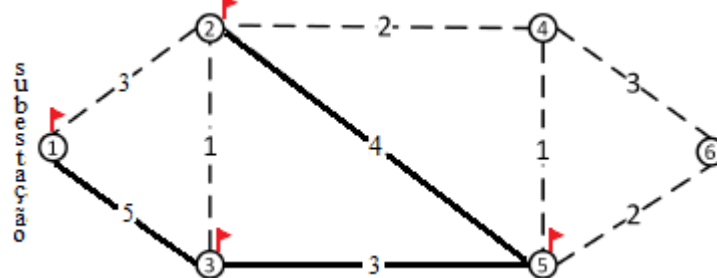
Figura 8 – Grafo para aplicação do algoritmo de PRIM – 2ª ligação.



Fonte: próprio autor.

Dentre as barras marcadas (1, 3 e 5), são listadas as possibilidades de ligação tem-se os ramos 1-2, 3-2, 5-2, 5-4 e 5-6, seleciona-se o ramo de maior peso 5-2 de modo a não gerar laço e assim a barra 2 é marcada de acordo com a Figura 9.

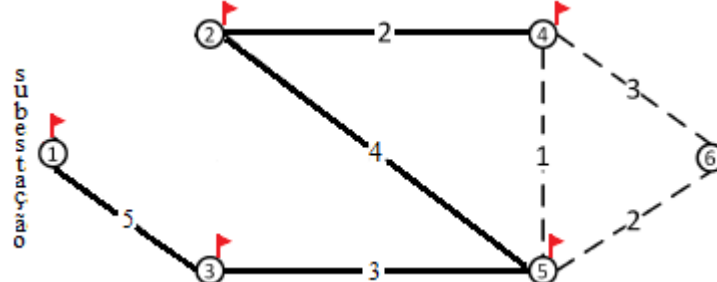
Figura 9 – Grafo para aplicação do algoritmo de PRIM – 3ª ligação.



Fonte: próprio autor.

A partir das barras marcadas (1, 3, 5 e 2), as possíveis ligações são 1-2, 3-2, 5-4, 5-6 e 2-4, cujos pesos são 3, 1, 1, 2 e 2 respectivamente. O ramo (3-2) e o ramo (1-2) apesar de possuir maior peso, gera um laço, assim estas possibilidades são descartadas e eliminadas do espaço de busca. Nas possibilidades restantes há um empate de pesos, então é utilizado o critério adotado anteriormente, o ramo 2-4 é selecionado e a barra 4 é marcada, conforme mostra a Figura 10.

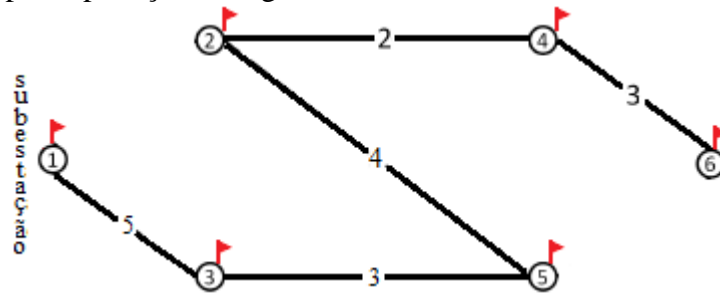
Figura 10 – Grafo para aplicação do algoritmo de PRIM – 4ª ligação.



Fonte: próprio autor.

Dentre as barras marcadas, somente as barras 4, 5 e 6 possuem possibilidades de ligação através dos ramos (4-5), (4-6) e (5-6), porém a ligação (4-5) gera laço, desta forma é descartada e eliminada do espaço de busca. Assim, o ramo de maior peso (4-6) é ligado finalizando o processo. O sistema resultante é representado pela Figura 11.

Figura 11 – Grafo para aplicação do algoritmo de PRIM – sistema resultante.



Fonte: próprio autor.

O algoritmo de Prim possibilita que sejam obtidas diversas árvores geradoras (sistemas radiais) que pertençam à região factível obedecida a restrição de radialidade.

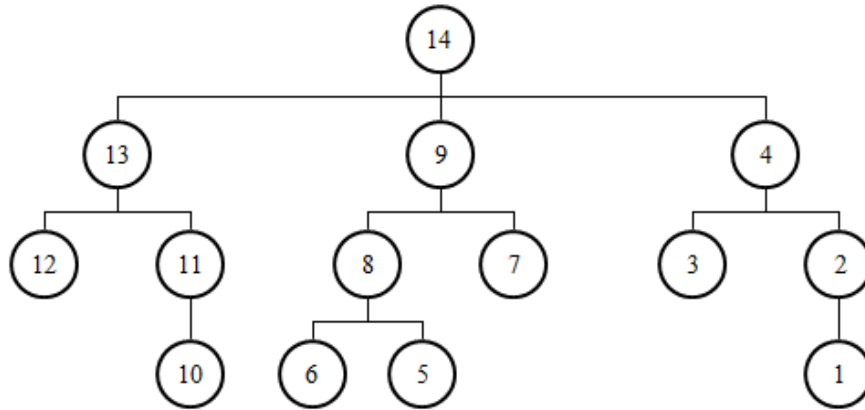
Após gerar uma solução com a aplicação do algoritmo de Prim, são calculadas as perdas ativas e a tensão nas barras através da solução do fluxo de carga para sistemas radiais ou método de varredura de Shirmohammadi et al. (1988).

#### 4.4 FLUXO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS RADIAIS

Esta seção apresenta um algoritmo de fluxo de carga radial bastante eficiente, chamado método de varredura desenvolvido por Shirmohammadi et al. (1988). O método de varredura é um processo iterativo que no passo chamado *backward* parte das barras finais em direção à subestação (ou barra de referência) onde são calculadas as correntes de carga, as correntes de ramo e as perdas de potência ativa e no processo inverso *forward* são calculadas as tensões nas barras. O algoritmo do método de varredura é conceitualmente simples e bastante utilizado em trabalhos de pesquisa na área de distribuição de energia.

A Figura 12 ilustra um sistema de 14 barras com a ordem original e para aplicar o método de varredura é necessário renumerar e reordenar as barras e ramos na forma de camadas.

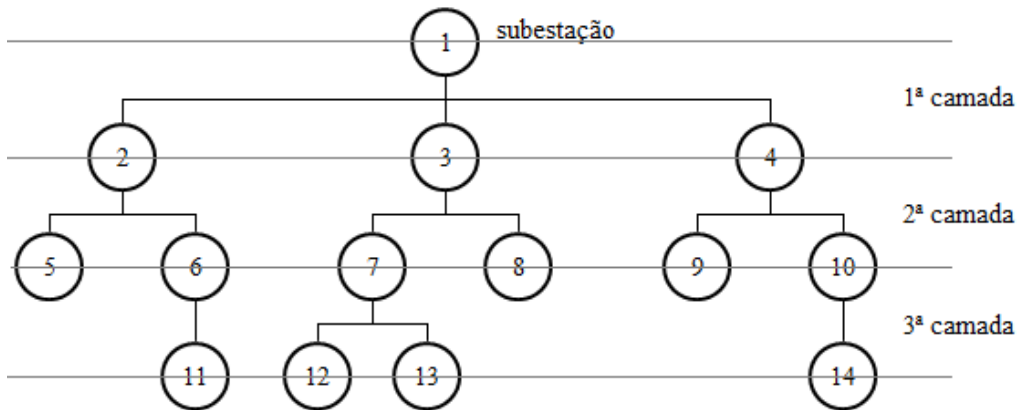
Figura 12 – Sistema radial de 14 barras – ordem original.



Fonte: Elaboração do autor.

A primeira camada é reordenada iniciando pela subestação (barra de saída) renumerando as barras que são conectadas à subestação (barras de chegada) através dos ramos. Na segunda camada são renumeradas as barras que são conectadas às barras de chegada da primeira camada, as demais camadas são renumeradas seguindo a mesma lógica. A Figura 13 ilustra o sistema após a ordenação.

Figura 13 – Sistema radial de 14 barras – reordenado.



Fonte: Elaboração do autor.

Terminado o processo de renumeração das barras e dos ramos inicia-se o cálculo do FP para o sistema radial que acontece de forma iterativa.

Para iniciar o cálculo do fluxo de potência radial é escolhido um valor para o módulo da tensão nas barras, normalmente é escolhida a tensão da subestação, isto é, para cada barra  $k$  tem-se  $V_k = V_{ref} + j0$  onde  $V_{ref}$  é o módulo da tensão da subestação.

Conhecida a tensão nas barras e ao percorrer da barra da extremidade até a subestação, calcula-se a corrente de carga nas barras e as correntes nos ramos, este procedimento é denominado *backward*.

Calculadas as correntes de ramo é possível conhecer a corrente que sai da subestação e também calcular as perdas ativas (e reativas) aproximadas em cada ramo e assim determinar um valor aproximado das perdas do sistema.

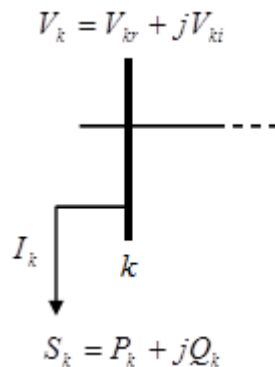
Obtidos os valores de corrente de ramo, inicia-se o processo a partir da subestação até as barras extremas, recalcula-se o valor da tensão em todas as barras do sistema em um procedimento chamado *forward*. Com as tensões nas barras atualizadas, novamente é executado o procedimento *backward*, até um critério de parada escolhido.

O critério de parada é alcançado quando a variação das perdas ativas  $|\Delta P_a|$  entre duas iterações consecutivas é menor que uma tolerância  $\varepsilon$  determinada, ou seja,  $|\Delta P_a| \leq \varepsilon$ .

#### 4.4.1 Cálculo da corrente de carga e de ramo

Para o cálculo da corrente de carga em cada barra toma-se o trecho hipotético ilustrado na Figura 14 de um sistema radial onde se tem uma barra  $k$  com uma carga  $S_k$ , sob tensão  $V_k$ , e corrente de carga  $I_k$  dadas pelas equações (20), (21) e (22) respectivamente.

Figura 14 – Sistema radial – cálculo da corrente de carga em uma barra  $k$ .



Fonte: próprio autor.

$$S_k = P_k + jQ_k \quad (20)$$

$$V_k = V_{kr} + jV_{ki} \quad (21)$$

$$I_k = I_{kr} + jI_{ki} \quad (22)$$

onde:

$P_k, V_{kr}$  e  $I_{kr}$  são as componentes real da potência, tensão e corrente de carga respectivamente

$Q_k, V_{ki}$  e  $I_{ki}$  são as componentes imaginária da potência, tensão e corrente de carga respectivamente

Por definição tem-se:

$$S_k = V_k I_k^* \Rightarrow I_k = \left( \frac{S_k}{V_k} \right)^* \quad (23)$$

Substituindo (21) e (22) em (24):

$$I_k = \left( \frac{P_k + jQ_k}{V_{kr} + jV_{ki}} \right)^* = \frac{(P_k V_{kr} + Q_k V_{ki}) + j(P_k V_{mi} - Q_k V_{kr})}{V_{kr}^2 + V_{ki}^2} \quad (24)$$

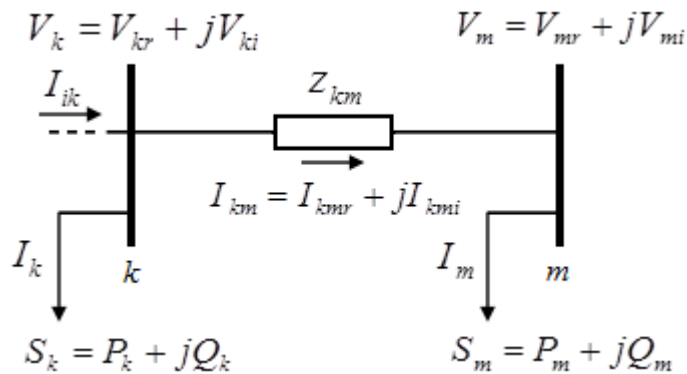
A partir de (24) separam-se as componentes real (25) e imaginária (26) da corrente de carga:

$$I_{kr} = \frac{P_k V_{kr} + Q_k V_{ki}}{V_{kr}^2 + V_{ki}^2} \quad (25)$$

$$I_{ki} = \frac{P_k Q_{ki} - Q_k V_{kr}}{V_{kr}^2 + V_{ki}^2} \quad (26)$$

Supondo que  $m$  é uma barra terminal, tem-se o sistema hipotético com as barras  $km$  conforme mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Sistema radial em um ramo  $km$ .



Fonte: próprio autor.

A corrente no ramo  $km$  é definida por:

$$I_{km} = I_{kmr} + jI_{kmi} \quad (27)$$

Sendo assim, a corrente de ramo  $I_{ik}$  é calculada pela corrente de carga da barra  $k$  ( $I_k$ ) e as correntes de carga das  $l$  barras que estão ligadas à barra  $k$  localizadas em camadas inferiores, equação (29).

$$I_{ik} = I_k + \sum_{kl \in \Omega_l} I_{kl} \quad (28)$$

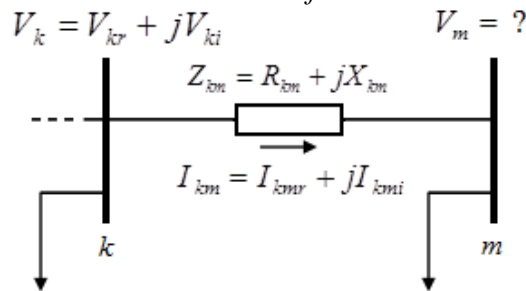
A equação (28) é aplicada partindo da última camada até a subestação no processo *backward*.

#### 4.4.2 Cálculo da tensão nas barras

A próxima etapa do método de varredura consiste em calcular as tensões nas barras do sistema de distribuição a partir da subestação ou barra de referência até a barra terminal, processo *forward*,

A Figura 16 apresenta o trecho hipotético de um sistema radial com as barras  $k$  e  $m$ , onde são conhecidas a tensão na barra  $k$ , a corrente do ramo e a impedância do ramo. Deseja-se encontrar a tensão na barra  $m$ ,  $V_m = V_{mr} + jV_{mi}$ .

Figura 16 – Sistema radial – cálculo das tensões – *forward*.



Fonte: próprio autor.

A tensão na barra  $k$  é dada por (29), a corrente do ramo  $km$  (30) e a impedância do ramo  $km$  (31).

$$V_k = V_{kr} + jV_{ki} \quad (29)$$

$$I_{km} = I_{kmr} + jI_{kmi} \quad (30)$$

$$Z_{km} = R_{km} + jX_{km} \quad (31)$$

Por definição, tem-se:

$$V_m = V_k - Z_{km} I_{km} \quad (32)$$

Substituindo (29), (30) e (31) em (32), tem-se:

$$V_m = V_k + jV_{ki} - (R_{km} + jX_{km})(I_{kmr} + jI_{kmi}) \quad (33)$$

A partir de (33), as componentes real e imaginária da tensão são mostradas respectivamente em (34) e (35):

$$V_{mr} = V_{kr} - R_{km} I_{kmr} + X_{km} I_{kmi} \quad (34)$$

$$V_{mi} = V_{ki} - R_{km} I_{kmi} - X_{km} I_{kmr} \quad (35)$$

#### 4.4.3 Cálculo das perdas

Para cada ramo que liga uma barra  $i$  com a barra  $j$ , das quais já são conhecidas as tensões e a impedância do ramo  $Z_{ij}$  é possível calcular as perdas ativas e reativas nos ramos do sistema utilizando a relação:

$$P_{ij} = R_{ij} (I_{ij})^2 \quad (36)$$

$$Q_{ij} = X_{ij} (I_{ij})^2 \quad (37)$$

onde  $P_{ij}$  e  $Q_{ij}$  são, respectivamente, as perdas ativa e reativa no ramo  $ij$ .

A partir das equações acima, as perdas ativas e reativas totais do sistema são calculadas conforme as equações (38) e (39).

$$P_{ij} = \sum_{ij \in \Omega_i} R_{ij} (I_{ij})^2 \quad (38)$$

$$Q_{ij} = \sum_{ij \in \Omega_i} X_{ij} (I_{ij})^2 \quad (39)$$

Nesta seção foi apresentada a aplicação do algoritmo de FP para sistemas de distribuição radiais para calcular a tensão nas barras e as correntes nos ramos que são utilizadas para a obtenção da perda de potência ativa total do sistema. Com esse valor é possível calcular a FO que representa o custo destas perdas na operação do sistema.

#### 4.4.4 Cálculo da função objetivo

O cálculo da FO, Equação (40), considera as perdas de potência ativa no sistema em seus  $i$  níveis de carregamento, o tempo de operação (em horas) em cada nível no período de um ano e o custo da energia (\$/kWh). A função objetivo apresenta o custo das perdas no sistema e é utilizado para avaliar a qualidade da solução nos problemas de RSDEE.

$$f = K_e \sum_{i=0}^{nc} T_i P_i \quad (40)$$

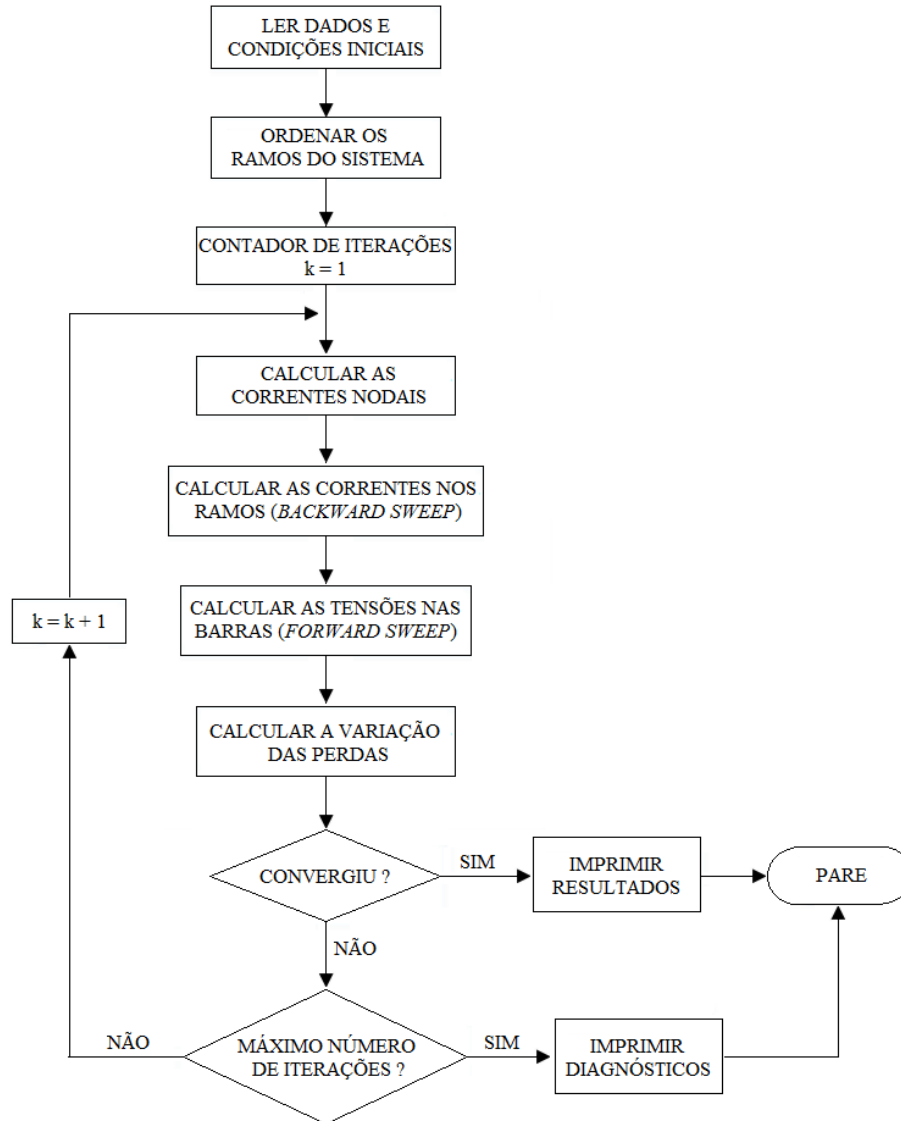
onde

- $f$  função objetivo.
- $K_e$  é o custo da energia (em \$/kWh).
- $nc$  níveis de carregamento.
- $T_i$  tempo de operação do sistema no carregamento  $i$ .

$P_i$  perdas de potência ativa no carregamento  $i$ .

A Figura 17 apresenta o fluxograma geral do algoritmo de FP para sistemas de distribuição radiais utilizando o método de varredura.

Figura 17 – Algoritmo do FP para sistemas radiais.



Fonte: Shirmohammadi et al. (1988).

## 5 ALOCAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES

Neste capítulo é apresentado o problema de alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica radiais. As empresas concessionárias responsáveis pelos sistemas de distribuição de energia elétrica vêm se preocupando cada vez mais com a qualidade da energia fornecida, devido a maior fiscalização dos órgãos reguladores.

É desejável que o fornecimento de energia elétrica seja constante, com o mínimo de interrupções possível, a tensão dentro dos limites especificados pelo órgão regulador e que o nível de componentes harmônicas seja o mínimo possível.

O controle de tensão de fornecimento pode ser realizado com a utilização de ferramentas, tais como: transformadores com *tap* variável automaticamente na subestação (*OLTC*), instalação de reguladores de tensão (RT), instalação de capacitores *shunt* em locais estratégicos. A utilização de reguladores de tensão ainda não é tão comum devido ao custo mais elevado quando comparadas com as demais ferramentas, desta forma as concessionárias têm optado por alternativas mais baratas e com boa eficiência, como a instalação de capacitores *shunt* na rede primária, desde que devidamente dimensionados e alocados.

A instalação de capacitores no sistema de distribuição traz consigo diversas vantagens, das quais pode-se citar:

1. Redução da potência reativa que circula no sistema;
2. Redução das perdas de potência ativa na rede;
3. Melhoria do perfil de tensão.

Apesar dos benefícios trazidos ao sistema pela instalação de capacitores, esta alternativa pode trazer alguns problemas, tais como:

1. Sobrecompensação
2. Ressonância

### 5.1 MODELO MATEMÁTICO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BANCOS

O problema de alocação de banco de capacitores em sistemas reconfigurados pode ser mostrado por um modelo cônico de segunda ordem inteiro misto (Ribeiro, 2013) que considera a alocação de capacitores fixos e automáticos em níveis de demanda variáveis. As equações (41)-(44) representam o estado de operação em regime permanente de um sistema

de distribuição radial e as demais fazem consideração à presença de bancos de capacitores e diferentes níveis de demanda.

$$\min v = k_c \sum_{i \in \Omega_b} (c^{fx} q_i + c^{sw} q_i^{sw} + c^{un} n_i^{cp}) + t_l \sum_{i \in \Omega_b} c_d^{ls} D_d \sum_{i \in \Omega_b} (R_{ij} I_{ij,d}^{qdr}) \quad (41)$$

sujeito a:

$$\sum_{ki \in \Omega_l} P_{ki,d} - \sum_{ij \in \Omega_l} (P_{ij,d} + R_{ij} I_{ij,d}^{qdr}) + P_{i,d}^S = P_{i,d}^D \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (42)$$

$$\sum_{ki \in \Omega_l} Q_{ki,d} - \sum_{ij \in \Omega_l} (Q_{ij,d} + X_{ij} I_{ij,d}^{qdr}) + Q_{i,d}^S + Q^{cp} n_{i,d} = Q_{i,d}^D \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (43)$$

$$V_{i,d}^{qdr} - 2(R_{ij} P_{ij,d} + X_{ij} Q_{ij,d}) - Z_{ij}^2 I_{ij,d}^{qdr} - V_{j,d}^{qdr} = 0 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (44)$$

$$V_{i,d}^{qdr} I_{ij,d}^{qdr} \geq P_{ij,d}^2 + Q_{ij,d}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (45)$$

$$\underline{V}^2 \leq V_{i,d}^{qdr} \leq \bar{V}^2 \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (46)$$

$$0 \leq I_{ij,d}^{qdr} \leq \bar{I}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (47)$$

$$0 \leq n_i^{cp} \leq \bar{n}_b^{cp} q_i \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (48)$$

$$n_{i,d} \leq n_i^{cp} \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (49)$$

$$-\bar{n}_b^{cp} q_i^{sw} \leq n_{i,d} - n_{i,d-1} \leq \bar{n}_b^{cp} q_i^{sw} \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \mid d > 1 \quad (50)$$

$$\sum_{i \in \Omega_b} q_i \leq \bar{n}^{cp} \quad (51)$$

$$n_{i,d} \text{ inteiro} \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (52)$$

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

$$q_i^{sw} \in \{0,1\} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (54)$$

onde

$k_c$	fator de recuperação de capital do banco de capacitor;
$c^{fx}$	custo de instalação dos bancos de capacitores fixos ou automáticos (\$);
$q_i$	variável binária para alocação de um banco de capacitor fixo ou automático no nó $i$ ;
$c^{sw}$	custo do equipamento dos bancos de capacitores automáticos (\$);
$q_i^{sw}$	variável binária para alocação de um equipamento chaveado para módulos de capacitores no nó $i$ ;
$c^{un}$	custo unitário de cada módulo de capacitor (\$);
$n_i^{cp}$	número de módulo de capacitores instalados no nó $i$ ;

$t_l$	taxa de recuperação dos custos das perdas de potência ativa;
$c_d^{ls}$	custo da energia nos níveis de demanda $d$ (\$/kWh);
$D_d$	número de horas em um ano do nível de demanda $d$ (h);
$R_{ij}$	resistência do ramo $ij$ ;
$I_{ij,d}^{qdr}$	variável que representa o quadrado de $I_{ij,d}$ no nível de demanda $d$ ;
$P_{ij,d}$	fluxo de potência ativa no circuito $ij$ no nível de demanda $d$ ;
$P_{i,d}^S$	fluxo de potência ativa fornecido pela subestação no circuito $ij$ no nível de demanda $d$ ;
$P_{i,d}^D$	demanda de potência ativa no nó $i$ no nível de demanda $d$ ;
$Q_{ij,d}$	fluxo de potência reativa no circuito $ij$ no nível de demanda $d$ ;
$Q_{i,d}^S$	fluxo de potência reativa fornecido pela subestação no circuito $ij$ no nível de demanda $d$ ;
$Q^{cp}$	potência reativa de cada módulo de capacitor (kVAr);
$n_{i,d}$	número de módulos de capacitores operantes no nó $i$ no nível de demanda $d$ ;
$Q_{i,d}^D$	demanda de potência reativa no nó $i$ no nível de demanda $d$ ;
$V_{i,d}^{qdr}$	variável que representa o quadrado de $V_{i,d}$ no nível de demanda $d$ ;
$X_{ij}$	reatância do circuito $ij$ ;
$Z_{ij}$	impedância do circuito $ij$ ;
$\underline{V}$	magnitude da tensão mínima (kV);
$\overline{V}$	magnitude da tensão máxima (kV);
$\overline{I}_{ij}$	limite máximo da magnitude de corrente no circuito $ij$ ;
$n_b^{cp}$	número máximo de módulos de capacitores que podem ser instalados no nó do sistema;
$n^{cp}$	número máximo de bancos de capacitores fixos ou chaveados que podem ser adicionados no sistema;
$\Omega_b$	conjunto de nós;
$\Omega_l$	conjunto de circuitos;
$\Omega_d$	conjunto dos níveis de demanda.

A função objetivo (41) representa o custo total de operação do sistema, que inclui o custo de investimento com bancos de capacitores do qual conta com o custo de instalação de bancos de capacitores (fixos ou automáticos), custo do equipamento para o chaveamento dos bancos e o custo dos módulos de capacitores instalados, além do custo anual das perdas de energia.

A restrição (42) representa o balanço de potência ativa em cada nó  $i$ , no nível de demanda  $d$ . A demanda de potência ativa no nó  $P_{i,d}^D$  é obtida pela soma do fluxo total de potência

ativa que chega no nó  $\sum_{ji \in \Omega_i} P_{ji,d}$  com a injeção de potência ativa no nó pela subestação  $P_{i,d}^S$ , assim subtraindo pela soma do fluxo total de potência ativa que está deixando o nó com as perdas no circuito  $\sum_{ki \in \Omega_i} (P_{ij,d} + R_{ij} I_{ij,d}^{qdr})$ .

A restrição (43) representa o balanço de potência reativa, considerando a presença dos bancos de capacitores, em cada nó  $i$  no nível de demanda  $d$ . A demanda de potência reativa no nó  $Q_{i,d}^D$  é obtida pela soma do fluxo total de potência reativa que chega no nó  $\sum_{ji \in \Omega_i} Q_{ji,d}$  com a injeção de potência reativa no nó pela subestação  $Q_{i,d}^S$  e a injeção de potência reativa no nó fornecida pelos bancos de capacitores operantes  $Q^{cp} n_{i,d}$ , assim subtraindo pela soma do fluxo total de potência reativa que está deixando o nó e suas perdas no circuito  $\sum_{ij \in \Omega_i} (Q_{ij,d} + X_{ij} I_{ij,d}^{qdr})$ .

A restrição (44) define a queda de tensão pela aplicação da segunda lei de Kirchhoff, na qual a magnitude da tensão no nó final  $V_{j,d}^{qdr}$  é calculada através do valor da magnitude de tensão no nó inicial  $V_{i,d}^{qdr}$ , subtraído pelo valor de demanda em um ponto de operação no sistema  $2(R_{ij} P_{ij,d} + X_{ij} Q_{ij,d})$ , e pelas perdas de potência ativa e reativa no circuito  $ij$  ( $Z_{ij}^2 I_{ij,d}^{qdr}$ ).

A restrição (45) representa a magnitude do fluxo da corrente, trata-se de uma equação não linear devido à inequação que relaciona o produto da magnitude de tensão  $V_{i,d}^{qdr}$  com corrente  $I_{ij,d}^{qdr}$ , com o quadrado dos fluxos de potência ativa  $P_{ij,d}^2$  e reativa  $Q_{ij,d}^2$ . Essa relação é originalmente de igualdade e foi retirada da relação (44).

A restrição (46) representa os limites de tensão do nó ao quadrado, em que, para cada nó  $i$ , no nível de demanda  $d$ , o quadrado da magnitude de tensão  $V_{i,d}^{qdr}$  é limitado inferiormente pelo valor mínimo  $\underline{V}^2$  e superiormente pelo valor máximo  $\bar{V}^2$ .

A restrição (47) indica que os limites do fluxo de corrente no ramo  $ij$ , no nível de demanda  $d$  ( $I_{ij,d}^{qdr}$ ), limitado inferiormente pelo zero e superiormente pelo valor da corrente ao quadrado  $\bar{I}_{ij}^2$ .

A restrição (48) representa o número limite de módulos de capacitores instalados no nó  $i$   $n_i^{cp}$ , limitado inferiormente pelo número mínimo, zero, e superiormente pelo produto do número

máximo de módulos de capacitores que podem ser instalados no nó do sistema  $\overline{n_b^{cp}}$ , com a variável binária que indica a alocação ou não dos bancos de capacitores  $q_i$ .

A restrição (49) indica que o número de módulos de capacitores operantes no nó  $i$ , no nível de demanda  $d$ , ( $n_{i,d}$ ) tem que ser menor ou igual ao número de módulos de capacitores instalados no nó  $i$  ( $n_i^{cp}$ ).

Na restrição (50) a variável binária  $q_i^{sw}$  indica se há ou não a alocação do equipamento de chaveamento nos bancos de capacitores no nó  $i$ , ou seja, o número dos módulos de capacitores chaveados ligados pode ser diferente em cada nível de demanda, enquanto que o número dos módulos de capacitores fixos é o mesmo para todos os níveis de demanda.

A restrição (51) indica o número máximo de bancos de capacitores que podem ser instalados no sistema, o somatório da variável binária define se haverá ou não alocação de bancos de capacitores  $\sum_{i \in \Omega_b} q_i$  e deve ser menor ou igual ao número máximo de bancos de capacitores que podem ser adicionados no sistema  $\overline{n^{cp}}$ .

A restrição (52) é uma variável inteira  $n_{i,d}$  que indica o número de módulos de capacitores operantes no nó  $i$ , no nível de demanda  $d$ .

A restrição (53) é uma variável binária  $q_i$ , que indica se haverá ou não a alocação de bancos de capacitores (fixos ou chaveados) no nó  $i$ .

A restrição (54) é uma variável binária  $q_i^{sw}$ , que indica se haverá ou não a alocação do equipamento de chaveamento nos bancos de capacitores no nó  $i$ .

## 5.2 CAPACITORES FIXOS E CHAVEADOS

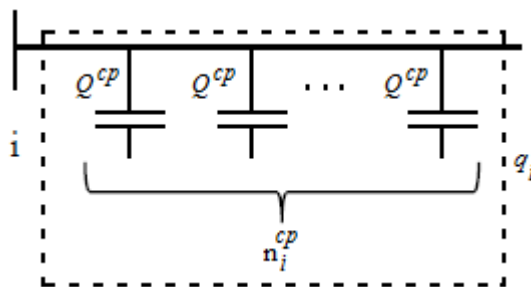
Os bancos de capacitores são fonte de injeção de potência reativa capacitiva no sistema de distribuição e podem ser formados por um ou mais módulos de capacitores. Os bancos de capacitores podem ser fixos ou chaveados.

### a) Capacitores fixos:

Os bancos de capacitores fixos são aqueles que são alocados nas barras do sistema e permanecem ligados independente do nível de carregamento. Na Figura 18 mostra-se a alocação de um banco com  $n$  capacitores na barra  $i$ , onde cada capacitor injeta uma potência

$Q^{cp}$ . No processo de alocação de bancos de capacitores desenvolvido neste trabalho, a cada iteração as barras candidatas recebem bancos de capacitor fixo de 300 kVAr.

Figura 18 – Banco de capacitor fixo.

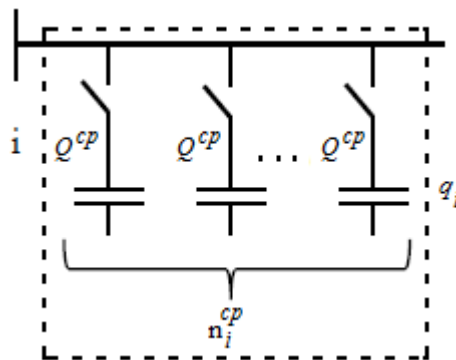


Fonte: próprio autor.

#### b) Capacitores chaveados:

Os capacitores chaveados são utilizados quando há necessidade de se realizar a instalação de bancos que não são demandados simultaneamente nos três níveis de carregamento. Desta forma, são instalados capacitores automáticos que são controlados por um dispositivo de acionamento dos bancos que realizam a injeção de potência reativa capacitiva ( $Q^{cp}$ ) de acordo com a necessidade do nível de carregamento através do chaveamento dos módulos de capacitores, como na Figura 19.

Figura 19 – Banco de capacitor chaveado.



Fonte: próprio autor.

### 5.3 GERAÇÃO DE SOLUÇÕES INICIAIS

A solução inicial utiliza a solução encontrada pelo algoritmo de Prim e aplica a análise de sensibilidade e em seguida um algoritmo de alocação de bancos de capacitores. A análise de sensibilidade consiste em elaborar um algoritmo de alocação de capacitores (fixos e automáticos) no sistema radial de acordo com características do sistema. Nos sistemas que já possuem capacitores instalados na configuração inicial, seus custos não são utilizados no cálculo da função objetivo. Guimarães (2009) apresentou três tipos de análise de

sensibilidade: por tensão nas barras, por análise das variações das perdas e por carga reativa nas barras.

Neste trabalho a alocação de bancos de capacitores, primeiramente é realizada a partir da barra com o menor nível de tensão que normalmente ocorre nas últimas barras dos ramos. Em um segundo momento é considerada a demanda reativa indutiva da barra, pois, se a barra candidata não possuir demanda reativa suficiente para que seja alocado banco de capacitor, a barra anterior a esta passa a ser candidata a receber o banco e a demanda reativa indutiva é acumulada.

No Capítulo 6 será apresentado o algoritmo de alocação de banco de capacitor.

#### 5.4 CÁLCULO DA FUNÇÃO OBJETIVO

Quando considerada apenas a alocação de bancos de capacitores, a função objetivo da equação (54) avalia o custo de investimento e operação dos bancos de capacitores, pois dentre estes custos estão inclusos: o de instalação de capacitores em cada barra, o custo da energia reativa capacitiva de bancos fixos e chaveados e as perdas de potência ativa no período de operação.

$$f_c = K_c n_{bc} + K_f \sum_{j=1}^{n_{cf}} C_{f_j} + K_a \sum_{j=1}^{n_{ca}} C_{a_j} + K_e \sum_{i=0}^{nc} T_i P_i \quad (54)$$

onde

- $f_c$  função objetivo que representa o custo total do investimento com a compra dos capacitores e os custos de perdas no período de operação.
- $K_c$  custo de instalação de banco por barra.
- $n_{bc}$  quantidade de barras que receberam banco de capacitor.
- $K_f$  custo da energia reativa capacitiva injetada pelo banco de capacitor fixo.
- $n_{cf}$  quantidade de banco de capacitor fixo instalado.
- $C_{f_j}$  potência reativa capacitiva do banco de capacitor fixo (em kVAr).
- $K_a$  custo da energia reativa capacitiva injetada pelo banco de capacitor automático.
- $n_{ca}$  quantidade de banco de capacitor automático instalado.
- $C_{a_j}$  potência reativa capacitiva do banco de capacitor automático (em kVAr).
- $K_e$  é o custo da energia (em \$/kWh)
- $nc$  níveis de carregamento
- $T_i$  tempo de operação do sistema no carregamento  $i$ .
- $P_i$  perdas de potência ativa no carregamento  $i$ .

## 6 A METODOLOGIA MULTIPARTIDA

A metodologia multipartida é uma estratégia de diversificação de solução onde são aplicados métodos construtivos e de melhoria local repetidas vezes em uma região já explorada na busca de uma solução ótima.

Na literatura existem aplicações da metodologia, tais como: a programação heurística em Muth e Thompson (1963), o problema do caixeiro viajante em Held e Karp (1970) e o problema da mochila em Senju e Toyoda (1968) e em Kochenberger, McCarl e Wyman (1974).

Os primeiros métodos multipartida baseavam-se em uma etapa de reinício, ou seja, o processo é reiniciado utilizando como solução inicial, uma solução anteriormente obtida, porém variada de forma aleatória. Nos problemas que possuem a possibilidade de mudança completa na construção de uma solução sem perder a factibilidade é aplicada a busca local juntamente com o processo construtivo a fim de melhorar as soluções geradas.

Atualmente, a combinação do procedimento de busca construtiva e busca local se tornou a forma usual de aplicação do método multipartida. Um dos métodos multipartida mais conhecido e utilizado na literatura é a meta-heurística GRASP proposta por Feo e Resende (1995). Neste método, a cada iteração do algoritmo é construída uma solução e posteriormente é realizada uma busca local na tentativa de encontrar o ótimo local.

O método multipartida é composto por duas fases: a primeira fase (fase construtiva) consiste em gerar uma solução e a segunda fase (fase de melhoria) consiste em melhorar a solução encontrada. A Figura 20 apresenta o algoritmo da metodologia multipartida, onde a cada iteração, é gerada uma solução  $x_i$  na fase construtiva, assim é iniciada a fase de melhoria local com a aplicação do método de busca na solução  $x_i$  na tentativa de melhorá-la, a solução encontrada na segunda etapa é chamada de  $x'_i$  e se a solução encontrada melhorar a incumbente, a incumbente é atualizada e o processo se repete até satisfazer o critério de parada.

Figura 20 – Algoritmo do método multipartida.

```

Iniciar  $i = 1$ 
Enquanto (critério de parada não for satisfeito)
{
    Passo 1 (Geração)
        Construir solução  $x_i$ 
    Passo 2 (Busca)
        Aplicar o método de busca para melhorar  $x_i$ 
        Fazer  $x'_i$  a solução obtida
        Se ( $x'_i$  melhorar a incumbente)
            Atualizar a incumbente
     $i = i + 1$ 
}

```

Fonte: Marti (2003).

As metodologias multipartida modernas contam com métodos inteligentes fazendo uso de estruturas de memória que intensificam a diversificação e possibilitam a exploração do espaço de soluções na busca de ótimos globais.

Fleurent e Glover (1999) utilizaram a meta-heurística busca tabu para descrever métodos que utilizam estruturas avançadas de memória para guiar a busca, o que contribui na melhoria dos métodos multipartida.

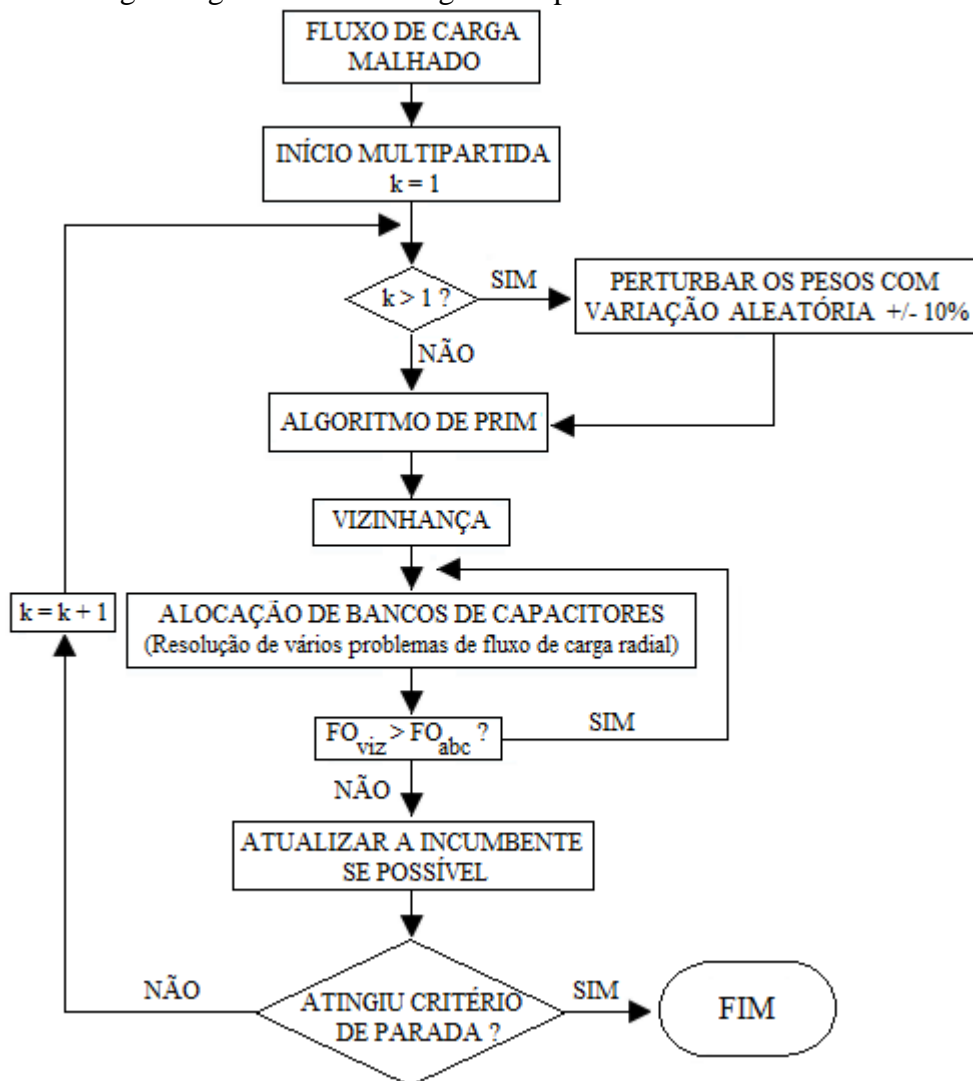
Em Marti (2003) são identificadas três características que classificam os métodos multipartida: memória, aleatoriedade e grau de reconstrução. Memória se refere aos elementos comuns para alguma solução gerada anteriormente, diminuindo a probabilidade de gerar soluções de má qualidade. Isto se deve ao fato de se fazer uso de conhecimento acumulado nas buscas anteriores. Aleatoriedade é uma maneira de se encontrar diversificação, porém sem controle sobre a diversidade. As soluções podem ser geradas de maneira aleatória ou de maneira mais sistemática. Os mecanismos sistemáticos são capazes de controlar as semelhanças entre as soluções geradas. Grau de reconstrução é uma parte do elemento que permanece fixa entre uma geração e outra. Algumas aplicações constroem soluções do zero, enquanto outras utilizam elementos de construção de soluções prévias.

Em sistemas de distribuição de energia elétrica, a metodologia pode ser aplicada para resolver simultaneamente o problema da reconfiguração e alocação de bancos de capacitores conforme procedimento a seguir, onde serão detalhadas as etapas da metodologia, e as estratégias empregadas.

## 6.1 A METODOLOGIA MULTIPARTIDA APLICADA NA RECONFIGURAÇÃO E NA ALOCAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS

Nesta seção é descrita a metodologia multipartida aplicada na otimização de sistema de distribuição radial na qual será realizada simultaneamente a reconfiguração e a alocação de bancos de capacitores, conforme mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Fluxograma geral da metodologia multipartida.



Fonte: próprio autor.

Para ser aplicada a metodologia faz-se necessário a uma etapa de preliminar para aquisição de dados conforme descrito na seção 3.1 deste trabalho. Nesta etapa as chaves normalmente abertas do sistema no caso base são fechadas e passa a assumir uma configuração malhada. Desta forma é resolvido um FC para sistemas fracamente malhados

para a obtenção do fluxo de potência ativa nos ramos do sistema e adicionado ao banco de dados.

A metodologia tem início com a fase construtiva na qual é aplicado o algoritmo de Prim para gerar uma topologia radial inicial. O sistema radial gerado é submetido à fase de melhoria na qual é realizada uma busca pela vizinhança com a finalidade de encontrar uma solução de melhor qualidade. Terminadas as fases construtiva e de melhoria, é adicionada a fase de alocação de bancos de capacitores na qual são alocados bancos de capacitores (fixos e/ou chaveados) nas barras do sistema de acordo com um algoritmo próprio (descrito na seção 6.1.3 deste trabalho) e a cada iteração a solução é avaliada pelo cálculo da função objetivo. A melhor solução encontrada é armazenada e o processo é repetido no qual um mecanismo de perturbação é aplicado causando uma variação aleatória nos pesos e são utilizados novamente pelo algoritmo de Prim na construção das demais soluções até atingir um critério de parada, dentre as soluções geradas, aquela que apresentar menor função objetivo é a solução do problema.

### **6.1.1 Fase inicial**

A fase inicial ou preliminar é a fase que antecede a aplicação da metodologia, nela são calculados: a FO do sistema para o caso base e os FP ativa do sistema malhado (pesos).

#### **1) Cálculo da função objetivo do sistema para o caso base;**

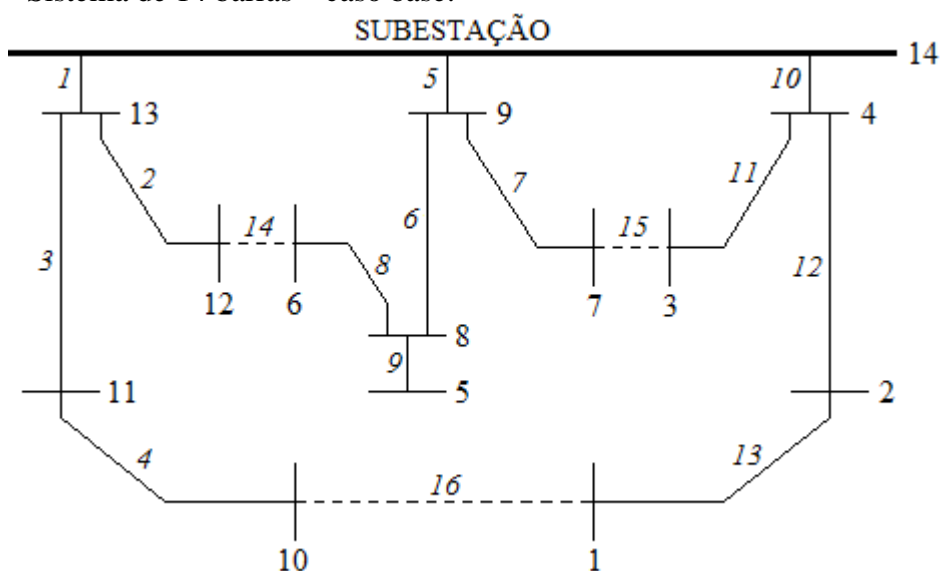
O sistema de distribuição radial inicial é chamado caso base, pois, a metodologia é aplicada com a finalidade de realizar a reconfiguração e a alocação de bancos de capacitores de modo a obter um sistema radial que opere de forma mais econômica.

Para o cálculo da FO é necessário resolver o problema do fluxo de carga radial para cada nível de carregamento, conforme descrito na Seção 4.4 deste trabalho, assim são obtidas as perdas de potência ativa em cada nível que são utilizadas para o cálculo da FO de acordo com a equação (40).

A função objetivo do caso base é utilizada como parâmetro de comparação para análise da viabilidade econômica da aplicação da metodologia.

Para ilustrar a aplicação da metodologia foi utilizado o sistema de 14 barras (Figura 22) de Civanlar et al. (1988) de forma modificada na qual foi retirada toda a demanda capacitiva nas barras do sistema.

Figura 22 – Sistema de 14 barras – caso base.



Fonte: próprio autor.

No caso base, as chaves 14, 15 e 16 encontram-se abertas e com a resolução do fluxo de carga radial são obtidas as perdas nos três níveis de carregamento e assim é calculada a função objetivo com o valor de \$412,55 (em \$/1000).

## 2) Resolução do problema de fluxo de carga para sistema fracamente malhado;

Com o fechamento das chaves normalmente abertas do caso base obtém-se um sistema malhado do qual é resolvido um fluxo de carga para sistema malhado com demanda normal. Conforme o procedimento descrito na seção 3.1 deste trabalho são calculados os fluxos de potência ativa em cada ramo do sistema, chamados de ‘pesos ideais’, e estes são adicionados ao banco de dados. Os pesos ideais são utilizados na fase construtiva pelo algoritmo de Prim como critério de construção da topologia radial.

Os pesos ideais encontrados para o sistema de 14 barras em análise são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Fluxo de potência ativa em cada ramo – sistema de 14 barras.

Ramo	de	para	Fluxo de potência ativa (kW) (pesos ideais)
1	14	13	10.567
2	13	12	5867
3	13	11	2580
4	11	10	570
5	14	9	11.115
6	9	8	7.359
7	9	7	425
8	8	6	2.217
9	8	5	4.521
10	14	4	7.573
11	4	3	2.434
12	4	2	4.052
13	2	1	3.035
14	12	6	2.830
15	7	3	1.425
16	10	1	930

Fonte: próprio autor.

Com o término da fase inicial, a metodologia multipartida é iniciada com a fase construtiva.

### 6.1.2 Fase construtiva

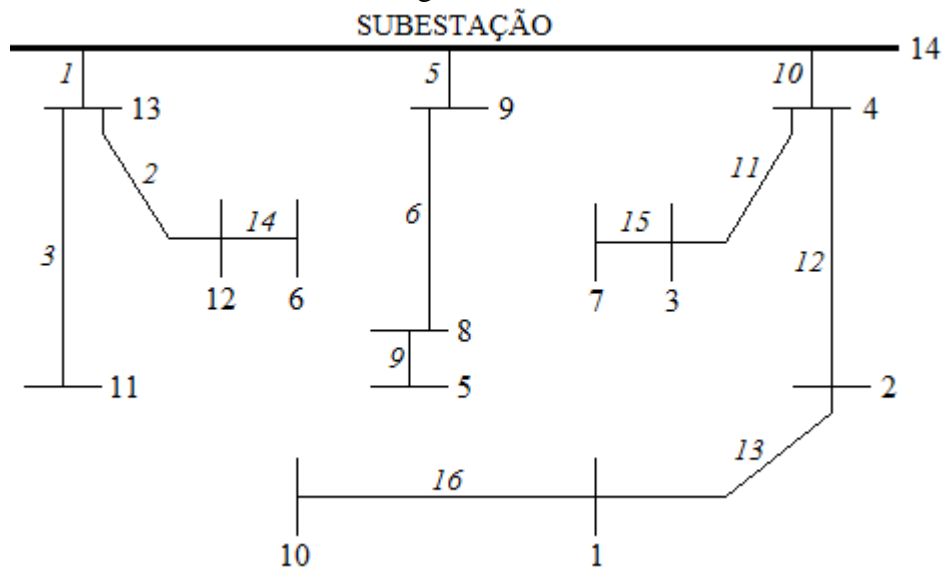
Na fase construtiva o algoritmo de Prim é aplicado com a finalidade de realizar a reconfiguração do sistema de modo a encontrar uma topologia radial de boa qualidade seguindo os seguintes passos:

- a) gerar uma solução radial inicial através da aplicação do algoritmo de Prim, cujo procedimento é descrito na Seção 4.3.1 deste trabalho. A primeira topologia radial é gerada com a utilização dos ‘pesos ideais’ mostrados na Tabela 1, as demais topologias são geradas pela reaplicação do método, mas com o uso de pesos modificados.
- b) resolver um FP radial para a topologia radial encontrada em (a) para os três níveis de carregamento, de acordo com o procedimento descrito na Seção 4.4 deste trabalho.
- c) calcular a FO utilizando a equação (55).

$$f_{ob} = K_e \sum_{i=0}^{nc} T_i P_i \quad (55)$$

No sistema de 14 barras em análise, a solução encontrada pelo algoritmo de Prim é dada pela abertura das chaves 4, 7 e 8, conforme mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Sistema de 14 barras – reconfigurado.



Fonte: próprio autor.

Com a aplicação do FP radial nos três níveis de carregamento, são obtidas as perdas de potência ativa em cada nível que são utilizadas no cálculo da função objetivo, cujo valor obtido foi de \$ 392,81 (em \$/1000).

A fase construtiva é encerrada, e para melhorar a solução encontrada é iniciada a fase de melhoria.

### 6.1.3 Fase de melhoria

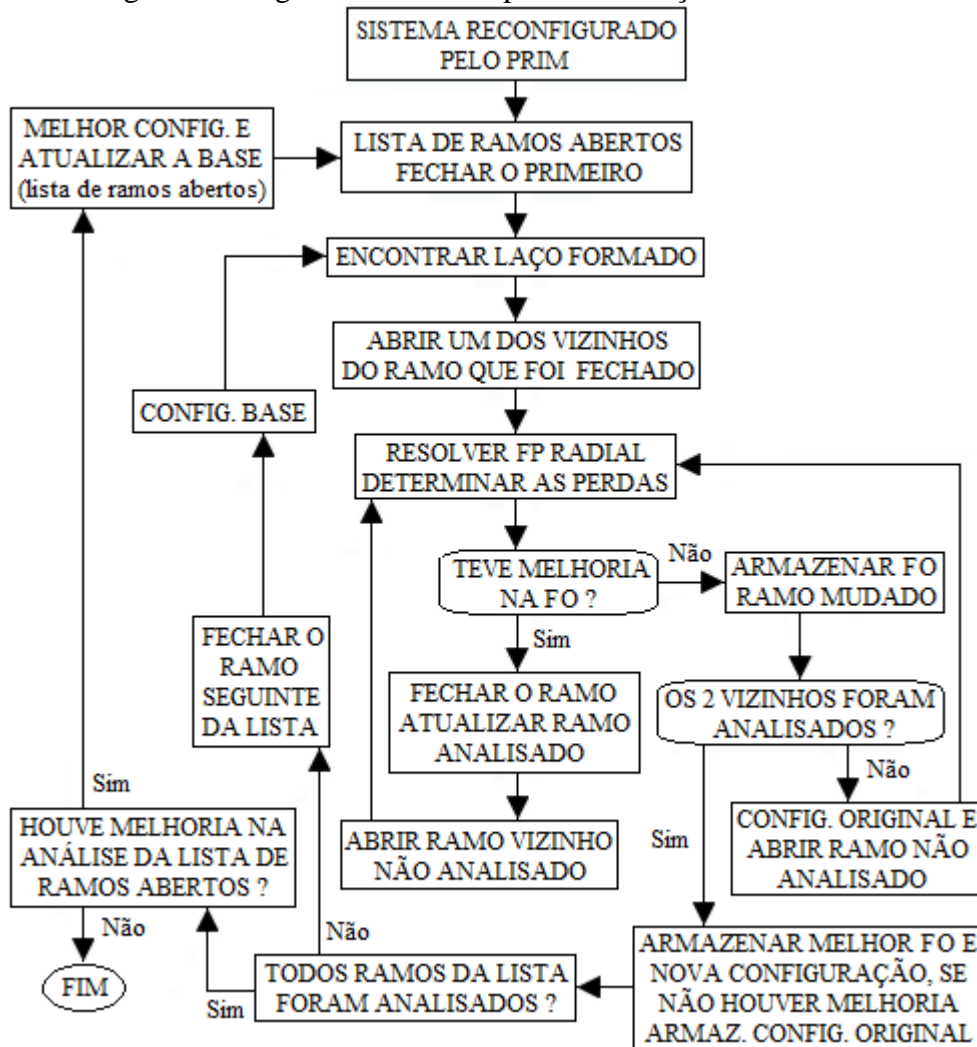
A melhoria local é a segunda etapa da metodologia e tem a finalidade de melhorar a solução encontrada na fase construtiva através do processo de busca pela vizinhança que consiste em trocar os ramos entre os vizinhos da solução. A cada modificação realizada a solução é avaliada pelo cálculo da FO (55).

- **Busca pela vizinhança:** O procedimento de busca pela vizinhança propõe a busca de soluções de melhor qualidade através da troca de ramos da topologia radial obtida na etapa de construção. Assim, os ramos que se encontravam abertos na etapa anterior são fechados para que os ramos vizinhos pertencentes ao mesmo laço sejam abertos de modo a manter a radialidade do sistema, o procedimento é repetido com cada vizinho até que sejam testados

todos os ramos do laço, em seguida o procedimento é aplicado nos demais laços do sistema. As chaves de cada laço que foram abertas e apresentaram FO favorável são armazenadas e compõem a solução corrente que será utilizada pelo algoritmo de alocação de bancos de capacitores.

O algoritmo de busca pela vizinhança aplicado neste trabalho é ilustrado no fluxograma da Figura 24.

Figura 24 – Fluxograma do algoritmo de busca pela vizinhança.



Fonte: próprio autor.

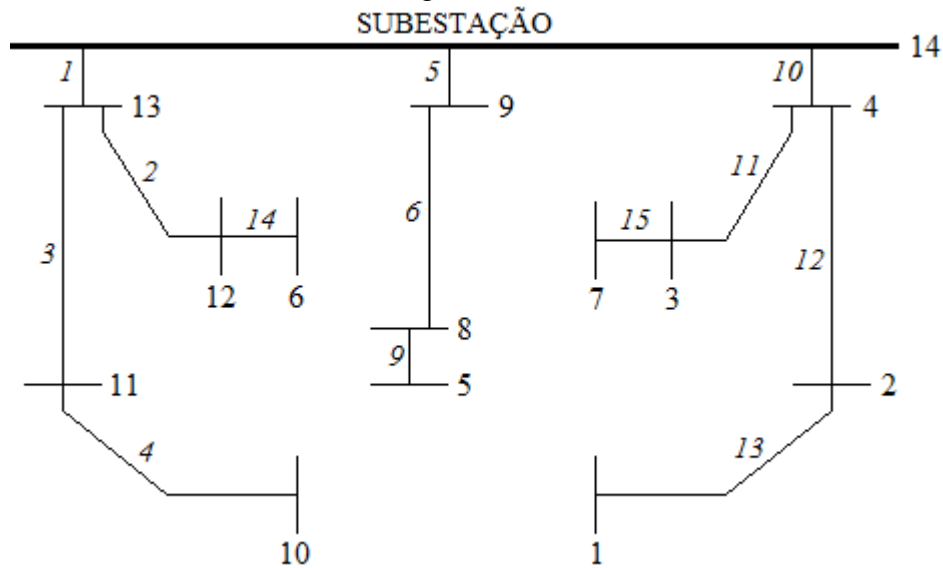
Com base no fluxograma o algoritmo de busca pela vizinhança é descrita pelos seguintes passos:

1. partir da topologia radial base obtida pelo algoritmo de Prim, vá para 2.
2. listar os ramos que estão abertos, fechar o primeiro. Ir para 3
3. identificar os laços formados pelo fechamento da chave, vá para 4.

4. abrir um dos vizinhos do ramo fechado, vá para 5.
5. Resolver o FP radial, determinar as perdas nos três carregamentos e calcular a FO. Ir para 6.
6. se houve redução da função objetivo, ir para 7. Caso contrário ir para 9.
7. fechar o ramo que foi aberto e atualizar o ramo analisado. Ir para 8.
8. abrir o ramo vizinho não analisado. Ir para 5.
9. armazenar a função objetivo e o ramo aberto da última configuração favorável introduzir o ramo base no sistema, vá para 10.
10. se os vizinhos dos dois lados foram analisados, ir para 12. Caso contrário ir para 11.
11. retornar a configuração base e abrir outro ramo que ainda não foi analisado. Ir para 5.
12. armazenar o valor da melhor função objetivo e a configuração.
13. Se todos os ramos da lista foram abertos ir para 15. Caso contrário ir para 14.
14. fechar o ramo seguinte da lista, retornar para a configuração base. Ir para 3.
15. se houver melhoria na análise da lista de ramos abertos, ir para 16. Caso contrário ir para 17.
16. armazenar a melhor configuração e atualizar a lista de ramos abertos. Ir para 2.
17. FIM.

A aplicação do algoritmo de busca pela vizinhança resulta em um sistema reconfigurado melhorado no qual foram abertas as chaves 7, 8 e 16 conforme mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Sistema de 14 barras – reconfigurado melhorado.



Fonte: próprio autor.

Com a aplicação do FP radial para os três níveis de carregamento, são obtidas as perdas de potência ativa em cada nível. Estas perdas são utilizadas para o cálculo da FO, a partir do qual se obteve o valor de \$ 379,57 (em \$/1000).

A fase de melhoria é concluída e a topologia radial melhorada resultante passará pelo processo de alocação de bancos de capacitores.

### 6.1.3 Alocação de bancos de capacitores

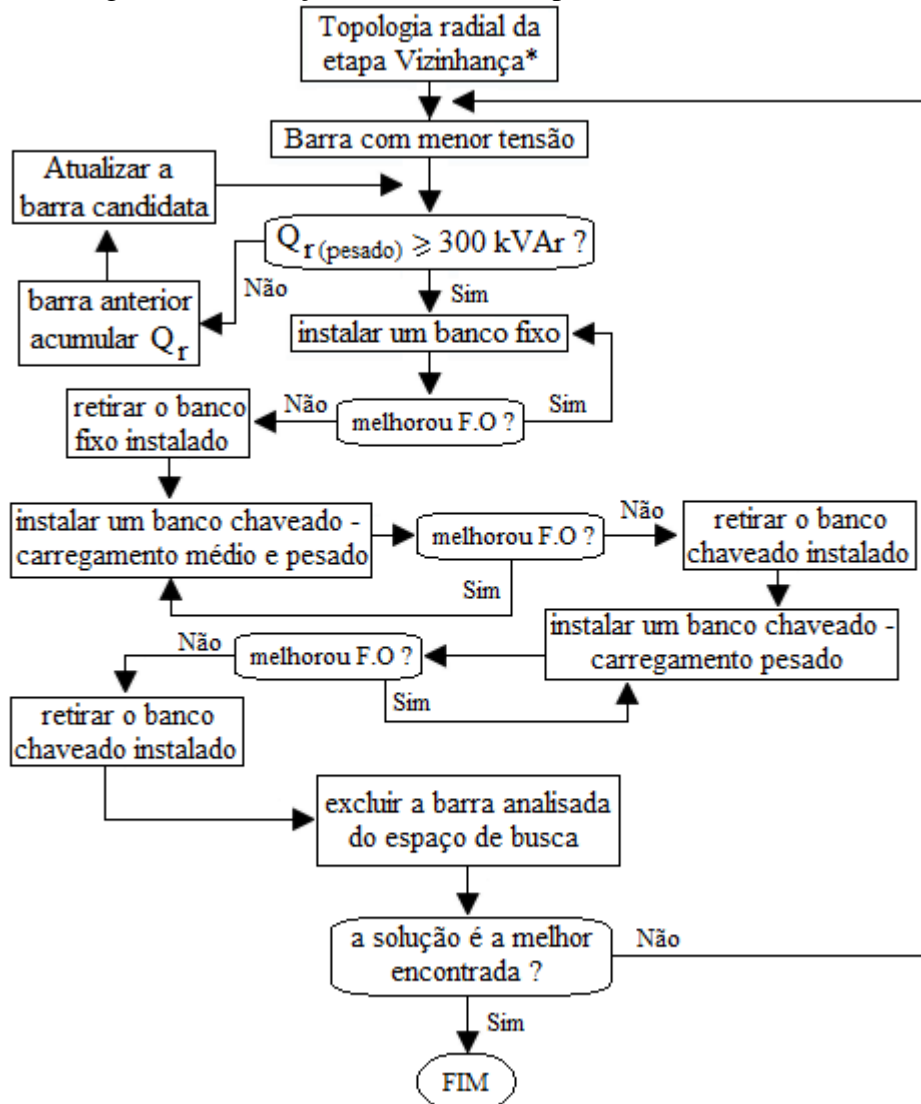
A partir do sistema que passou por uma fase de reconfiguração e de melhoria é chegada a hora de submetê-lo a fase de alocação de bancos de capacitores. A fase de alocação de bancos de capacitores é realizada em duas etapas sendo: a primeira consiste em realizar a alocação de bancos de capacitores (fixos e chaveados) a partir da barra que apresenta a menor tensão no sistema e a segunda etapa consiste em retirar bancos de capacitores das barras (de acordo com a numeração da barra em ordem crescente) a fim de verificar alocações que possam ser retiradas sem prejuízo da solução.

Na etapa de alocação de bancos de capacitores são analisados os níveis de tensão nas barras do sistema reconfigurado melhorado. Normalmente os menores níveis de tensão estão nas barras terminais dos ramos, desta forma estas barras se tornam candidatas a receber alocação, porém somente a análise dos níveis de tensão não é suficiente. Para a alocação de bancos é necessário que a barra possua, no carregamento pesado, uma demanda reativa mínima (300 kVAR) para ser compensada pelos bancos de capacitores, não permitindo que a

barra tenha demanda reativa negativa. Caso a barra candidata não possua demanda reativa suficiente é selecionada a barra imediatamente anterior e as demandas reativas indutivas são acumuladas até que seja alcançado o mínimo de 300 kVAr. A função objetivo é avaliada a cada alocação e encerrada quando a mais favorável (de menor valor) for encontrada e esta topologia é tida como solução que será analisada pelo algoritmo de retirada de bancos de capacitores.

O fluxograma da etapa de alocação de bancos de capacitores é mostrado na Figura 26.

Figura 26 – Fluxograma de alocação de bancos de capacitores.



Fonte: próprio autor.

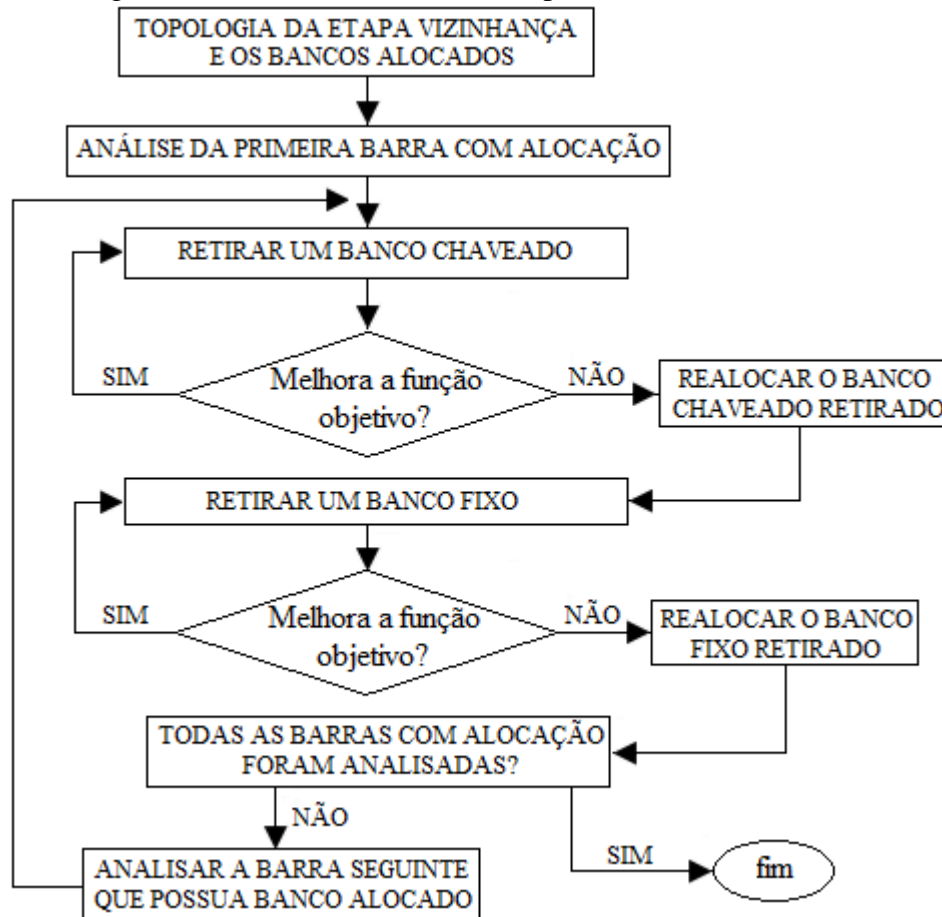
Neste fluxograma a alocação é realizada da seguinte maneira:

1. Iniciar com a topologia radial configurada e melhorada. Ir para 2.

2. Identificar no sistema a barra que apresenta a menor tensão. Ir para 3.
3. Se no carregamento pesado a barra possuir demanda reativa indutiva maior ou igual a 300kVAr, ir para 5. Caso contrário, ir para 4.
4. Selecionar a barra anterior e acumular as demandas reativas, atualizar a configuração das barras. Ir para 3.
5. Instalar um banco de capacitor fixo nos carregamentos: leve, médio e pesado. Ir para 6.
6. Se houver redução da função objetivo, ir para 5. Caso contrário ir para 7.
7. Retirar o banco de capacitor fixo instalado, ir para 8.
8. Instalar um banco de capacitor chaveado nos carregamentos: médio e pesado. Ir para 9.
9. Se houver redução da função objetivo, ir para 8. Caso contrário ir para 10.
10. Retirar o banco de capacitor chaveado (carregamento médio e pesado) instalado. Ir para 11
11. Instalar um banco de capacitor chaveado no carregamento pesado. Ir para 12.
12. Se houver redução da função objetivo, ir para 11. Caso contrário ir para 13.
13. Retirar o banco de capacitor chaveado (carregamento pesado) instalado. Ir para 14.
14. Excluir a barra atual da lista de barras candidatas a alocação. Ir para 15.
15. Se a solução encontrada for melhor que a atual, ir para 16. Caso contrário, ir para 2.
16. FIM.

Finalizado o processo de alocação de bancos de capacitores tem-se uma topologia radial reconfigurada com alocação de bancos de capacitores a partir do qual é aplicado um algoritmo próprio para a retirada de bancos de capacitores. Neste algoritmo as barras que possuem alocação de bancos são listadas (seguindo a numeração das barras em ordem crescente). O processo de retirada se inicia na primeira barra com alocação no qual são retirados bancos chaveados enquanto seja favorável, após isto são retirados bancos de capacitor fixo. Cada retirada de banco de capacitor é avaliada pelo cálculo da função objetivo, quando encontrada a mais favorável é encerrado o processo e a topologia encontrada é salva como a solução que apresenta o menor custo de operação. O algoritmo de retirada de bancos é apresentado no fluxograma mostrado na Figura 27.

Figura 27 – Fluxograma de retirada de bancos de capacitores.



Fonte: próprio autor.

O procedimento de retirada é descrito a seguir:

1. A partir da topologia fornecida pelo algoritmo de alocação. Ir para 2.
2. Seguir a numeração crescente das barras e que possuam bancos alocados, selecionar a primeira barra. Ir para 3.
3. Retirar um banco de capacitor chaveado. Ir para 4.
4. Se houver redução da função objetivo, ir para 3. Caso contrário ir para 5.
5. Realocar o banco chaveado retirado. Ir para 6.
6. Retirar um banco de capacitor fixo. Ir para 7.
7. Se houver redução da função objetivo, ir para 6. Caso contrário ir para 8.
8. Realocar o banco de capacitor fixo retirado. Ir para 9.
9. Se todas as barras que possuem bancos de capacitores foram analisadas. Ir para 11. Caso contrário ir para 10.

10. Analisar a próxima barra que possui banco de capacitor.

11. FIM.

Para o sistema de 14 barras dado com exemplo, a topologia resultante após a aplicação dos procedimentos de alocação e retirada de bancos de capacitores forneceu as seguintes alocações – n° da barra (n° de bancos) – bancos fixos: 5(3), 8(5), 9(4) e bancos chaveados: 8(0,4,4), 9(0,3,3). Assim, é aplicado o FP radial nos três níveis de carregamento a partir do qual são obtidas as perdas de potência ativa em cada nível que são utilizadas na relação (54) para o cálculo da FO encontrando o valor de \$ 341,27 (em \$/1000). Assim, é encontrada uma solução, ou seja, um sistema radial com redução de 17,3% no custo de operação.

Como forma de obter soluções diversificadas e ampliar a exploração do espaço de busca na tentativa de encontrar melhores soluções é implementado um algoritmo de perturbação aleatório aplicado aos pesos ideais dos ramos.

## 6.2 MECANISMO DE PERTURBAÇÃO DE PESOS

O mecanismo de perturbação de pesos tem a finalidade de gerar um fator de perturbação aleatório que ao ser aplicado provoca uma variação de  $\pm 10\%$  nos pesos ideais a cada repetição da metodologia. Este procedimento é utilizado para variar os parâmetros de construção de solução e sejam geradas soluções diversificadas, o que possibilita aplicar a metodologia de diferentes pontos de partida repetindo a aplicação até um critério de parada de modo a sair de uma solução ótima local e encontrar um ótimo global.

## 7 TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos pela aplicação da metodologia multipartida desenvolvida neste trabalho com a realização simultânea da reconfiguração e alocação de bancos de capacitores para otimizar os sistemas de distribuição de energia elétrica dados. A metodologia e os algoritmos desenvolvidos foram desenvolvidos em linguagem de programação C++ e os testes realizados em um laptop com processador Intel Core i5 de 2,5GHz e 6GB de RAM.

A aplicação do método utiliza alguns parâmetros fixos que são dados, tais como: nível de carregamento (0 Leve; 1 Média; 2 Alta), o fator multiplicativo de demanda para cada nível de carregamento ( $S_0 = 0,5$ ,  $S_1 = 1,0$  e  $S_2 = 1,8$ ), o tempo de operação do sistema em cada carregamento no período de um ano dado em horas ( $T_0 = 1000$ ,  $T_1 = 6760$ ,  $T_2 = 1000$ ), o custo da energia elétrica  $K_e=0,06$  (em \$/kWh), o custo da instalação de banco de capacitor por barra  $K_c=1000$  (em \$), o custo da carga de capacitores fixos  $K_f=3,00$  (em \$/kVAr) e o custo da carga de capacitores chaveados  $K_a=4,00$  (em \$/kVAr). O valor da função objetivo é apresentado na relação \$/1000. O número máximo de iterações foi fixado em 100 e a perturbação de pesos em  $\pm 10\%$  dos pesos ideais.

### 7.1 SISTEMA DE 69 BARRAS

O sistema de 69 barras no caso base opera com os ramos 70, 71, 72, 73, 74 abertos e as perdas nos níveis de carregamento leve, médio e pesado e a função objetivo são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados do sistema de 69 barras – caso base.

<b>Configuração Inicial (Chaves abertas)</b>	<b>FO [\$/1000]</b>
70, 71, 72, 73, 74	146,52
<b>Níveis de carga (0,5; 1,0; 1,8)</b>	<b>Perdas [kW]</b>
Leve	51,6430
Média	225,1777
Pesada	868,1802

Fonte: próprio autor.

A barra e o menor nível de tensão em cada carregamento para o caso base é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Sistema 69 barras – barras com menor tensão – caso base.

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Médio		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
66	0,95661	66	0,90895	66	0,81953

Fonte: próprio autor.

O sistema de 69 barras reconfigurado pelo algoritmo de Prim gerou como resultado a topologia radial com a abertura dos ramos 14, 21, 62, 70, 73. As perdas no carregamento leve, médio e pesado e a função objetivo são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultado sistema de 69 barras – reconfigurado.

<b>Configuração corrente (Chaves abertas)</b>	<b>FO [\$/1000]</b>
14, 21, 62, 70, 73	109,70
<b>Níveis de carga (0,5; 1,0; 1,8)</b>	<b>Perdas [kW]</b>
Leve	40,0783
Média	171,3450
Pesada	629,9410

Fonte: próprio autor.

Após a reconfiguração nota-se que a nova topologia apresentou redução nas perdas de potência ativa em todos os níveis de carregamento e consequentemente reduziu a FO.

Nos sistemas radiais, os menores níveis de tensão ocorrem nas barras terminais dos ramos ou nas mais distantes da subestação. Na Tabela 5 são apresentadas as tensões na barra 61 para os três níveis de carregamento.

Tabela 5 – Sistema 69 barras – barras com menor tensão – reconfigurado.

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Médio		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
61	0,96506	61	0,92746	61	0,85981

Fonte: próprio autor.

Nota-se que no sistema reconfigurado a barra 61 está localizada distante da subestação e com a reconfiguração os níveis de tensão aumentaram principalmente no carregamento pesado.

O sistema reconfigurado melhorado pela busca na vizinhança e com alocação de bancos de capacitores tem os resultados apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultado sistema de 69 barras – solução final.

<b>Configuração corrente (Chaves abertas)</b>	<b>FO [\$/1000]</b>
15, 59, 62, 70, 71	50,21
<b>Níveis de carga (0,5; 1,0; 1,8)</b>	<b>Perdas [kW]</b>
Leve	17,3212
Média	67,8678
Pesada	262,3660
<b>Capacitores fixos</b>	<b>Barra (número de bancos)</b>
300 kVAr	62(2), 65(1)
<b>Capacitores chaveados</b>	<b>Barra (número de bancos)</b>
300 kVAr	65(0,1,1)

Fonte: próprio autor.

Diante dos resultados apresentados conclui-se que para o sistema de 69 barras, o método foi capaz de reduzir as perdas de potência ativa nos três níveis de carregamento e apesar dos custos com os capacitores o custo de operação do sistema reduziu em 65,7% comparado com o caso base.

Os menores níveis de tensão em cada nível de carregamento na barra 61 são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Sistema 69 barras – barras com menor tensão – solução final.

<b>Barras com menor tensão</b>					
<b>Carregamento</b>					
<b>Leve</b>		<b>Médio</b>		<b>Pesado</b>	
<b>Barra</b>	<b>V(pu)</b>	<b>Barra</b>	<b>V(pu)</b>	<b>Barra</b>	<b>V(pu)</b>
61	0,98577	61	0,96407	61	0,91514

Fonte: próprio autor.

O pior caso ocorre no carregamento pesado e mesmo assim apresentou aumento de 10,4% no nível de tensão comparado ao caso base.

## 7.2 SISTEMA DE 84 BARRAS

O sistema de 84 barras no caso base opera com os ramos 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96 abertos e as perdas nos níveis de carregamento leve, médio e pesado bem como a FO são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados do sistema de 84 barras - caso base.

<b>Configuração Inicial (Chaves abertas)</b>	<b>FO [\$/1000]</b>
84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96	335,72
<b>Níveis de carga (0,5; 1,0; 1,8)</b>	<b>Perdas [kW]</b>
Leve	127,2125
Média	531,9966
Pesada	1.871,9030

Fonte: próprio autor.

A barra e o menor nível de tensão em cada carregamento no caso base são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Sistema 84 barras – barras com menor tensão – caso base.

<b>Barras com menor tensão</b>					
<b>Carregamento</b>					
<b>Leve</b>		<b>Médio</b>		<b>Pesado</b>	
<b>Barra</b>	<b>V(pu)</b>	<b>Barra</b>	<b>V(pu)</b>	<b>Barra</b>	<b>V(pu)</b>
9	0,96554	9	0,92767	9	0,85751

Fonte: próprio autor.

O sistema de 84 barras reconfigurado pelo algoritmo de Prim gerou como resultado a topologia radial com a abertura dos ramos 7, 33, 39, 42, 63, 72, 82, 84, 86, 88, 89, 90, 92. As perdas do sistema para esta configuração no carregamento leve, médio e pesado e a FO são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultado sistema de 84 barras – reconfigurado.

<b>Configuração corrente (Chaves abertas)</b>	<b>FO [\$/1000]</b>
7,33,39,42,63,72,82,84,86,88,89,90,92	237,31
<b>Níveis de carga (0,5; 1,0; 1,8)</b>	<b>Perdas [kW]</b>
Leve	91,7466
Média	379,1170
Pesada	1.300,5200

Fonte: próprio autor.

Após a reconfiguração nota-se que a nova topologia apresentou redução nas perdas de potência ativa em todos os níveis de carregamento e conseqüentemente reduziu a FO.

Nos sistemas radiais, os menores níveis de tensão tendem a ocorrer nas barras terminais dos ramos ou nas mais distantes da subestação. Na Tabela 11 são apresentadas as tensões na barra 71 para os três níveis de carregamento.

Tabela 11 – Sistema 84 barras – barras com menor tensão – reconfigurado.

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Médio		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
71	0,97845	71	0,95557	71	0,91634

Fonte: próprio autor.

Nota-se que no sistema reconfigurado a barra 71 está distante da subestação (final do ramo) e com a reconfiguração os níveis de tensão aumentaram principalmente no carregamento pesado.

O sistema reconfigurado melhorado pelo processo de busca na vizinhança e com alocação de bancos de capacitores tem os resultados apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultado sistema de 84 barras – solução final.

<b>Configuração corrente (Chaves abertas)</b>	<b>FO [\$/1000]</b>
7,28,33,39,42,55,63,71,83,86,88,89,90	216,36
<b>Níveis de carga (0,5; 1,0; 1,8)</b>	<b>Perdas [kW]</b>
Leve	74,4145
Média	310,2140
Pesada	1.117,8600
<b>Capacitores fixos</b>	<b>Barra (número de bancos)</b>
300 kVAr	6(2),58(2),71(3),81(3)
<b>Capacitores chaveados</b>	<b>Barra (número de bancos)</b>
300 kVAr	6(0,2,2),58(0,1,1),71(0,1,1), 81(0,1,1)

Fonte: próprio autor.

Diante dos resultados apresentados conclui-se para o sistema de 84 barras, o método foi capaz de reduzir as perdas de potência ativa nos três níveis de carregamento e apesar dos custos de instalação e operação dos capacitores o custo de operação do sistema reduziu em 35,5% comparado com o caso base.

Os menores níveis de tensão em cada nível de carregamento na barra 9 são mostrados na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultado 84 barras – barras com menor tensão – solução final.

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Médio		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
9	0,98747	9	0,96988	9	0,93221

Fonte: próprio autor.

O pior caso ocorre no carregamento pesado e mesmo assim apresentou aumento de 12,1% no nível de tensão quando comparado ao caso base.

### 7.3 SISTEMA DE 136 BARRAS

O sistema de 136 barras no caso base opera com os ramos 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156 abertos e as perdas nos níveis de carregamento leve, médio e pesado e a FO são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados sistema de 136 barras – caso base.

<b>Configuração Inicial (Chaves abertas)</b>	<b>FO [\$/1000]</b>
136,137,138,139,140,141,142,143,144,145,146, 147,148,149,150,151,152,153,154,155,156	201,64
<b>Níveis de carga (0,5; 1,0; 1,8)</b>	<b>Perdas [kW]</b>
Leve	77,0049
Média	320,3645
Pesada	1.117,9670

Fonte: próprio autor.

A barra e o menor nível de tensão em cada carregamento no caso base são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Sistema 136 barras – barras com menor tensão – caso base.

<b>Barras com menor tensão</b>					
<b>Carregamento</b>					
<b>Leve</b>		<b>Médio</b>		<b>Pesado</b>	
<b>Barra</b>	<b>V(pu)</b>	<b>Barra</b>	<b>V(pu)</b>	<b>Barra</b>	<b>V(pu)</b>
116	0,96651	116	0,92901	116	0,85793

Fonte: próprio autor.

O sistema de 136 barras reconfigurado pelo algoritmo de Prim gerou a topologia radial com a abertura dos ramos 9, 35, 50, 51, 54, 90, 96, 106, 126, 135, 136, 138, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155. As perdas do sistema para esta configuração no carregamento leve, médio e pesado e a função objetivo são apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Resultado sistema de 136 barras – reconfigurado.

<b>Configuração corrente (Chaves abertas)</b>	<b>FO [\$/1000]</b>
9,35,50,51,54,90,96,106,126,135,136, 138,143,144,145,146,147,148,150,151,155	162,04
<b>Níveis de carga (0,5; 1,0; 1,8)</b>	<b>Perdas [kW]</b>
Leve	62,973
Média	259,357
Pesada	884,461

Fonte: próprio autor.

Após a reconfiguração nota-se que a nova topologia apresentou redução nas perdas de potência ativa em todos os níveis de carregamento e conseqüentemente reduziu a FO.

Nos sistemas radiais, os menores níveis de tensão ocorrem nas barras terminais dos ramos ou nas mais distantes da subestação. Na Tabela 17 são apresentadas as tensões na barra 105 para os três níveis de carregamento.

Tabela 17 – Sistema 136 barras – barras com menor tensão – reconfigurado.

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Médio		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
105	0,97928	105	0,95733	105	0,91914

Fonte: próprio autor.

Nota-se que no sistema reconfigurado a barra 105 está distante da subestação e com a reconfiguração os níveis de tensão aumentaram principalmente no carregamento pesado.

O sistema reconfigurado melhorado pelo processo de busca na vizinhança e com alocação de bancos de capacitores tem os resultados apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultado sistema de 136 barras – solução final.

<b>Configuração corrente (Chaves abertas)</b>	<b>FO [\$/1000]</b>
7,35,50,51,54,94,106,118,126,135,137, 138,144,145,146,147,148,149,150,151,155	152,78
<b>Níveis de carga (0,5; 1,0; 1,8)</b>	<b>Perdas [kW]</b>
Leve	57,474
Média	235,118
Pesada	806,108
<b>Capacitores fixos</b>	<b>Barra (número de bancos)</b>
300 kVAr	58(2), 105(2)
<b>Capacitores chaveados</b>	<b>Barra (número de bancos)</b>
300 kVAr	-

Fonte: próprio autor.

Diante dos resultados apresentados conclui-se que para o sistema de 136 barras, o método foi capaz de reduzir as perdas de potência ativa nos três níveis de carregamento e apesar dos custos de instalação e operação dos bancos de capacitores o custo total de operação do sistema reduziu em 24,2% comparado com o caso base.

Os menores níveis de tensão em cada nível de carregamento na barra 9 são mostrados na Tabela 19.

Tabela 19 – Resultado 136 barras – barras com menor tensão – solução final.

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Médio		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
115	0,98508	115	0,96967	115	0,94389

Fonte: próprio autor.

O pior caso ocorre no carregamento pesado e comparado ao caso base apresentou elevação de 9,1% no nível de tensão.

## 8 CONCLUSÃO

A realização deste trabalho mostrou que a aplicação da metodologia multipartida no procedimento simultâneo de reconfiguração e alocação de bancos de capacitores em sistemas radiais é capaz de gerar solução de qualidade.

A aplicação do algoritmo de Prim na construção da árvore geradora máxima com o uso do fluxo de potência ativa dos ramos como critério de decisão para o fechamento de chaves do sistema se mostrou eficiente. Isso significa que a retirada de ramos com menores fluxos de potência causam menores perturbações no sistema e estas se tornam candidatas a serem retiradas da solução. A partir do sistema configurado pelo Prim, a fase de melhoria que realiza busca pela vizinhança pela troca de ramos vizinhos dentro do laço gera uma configuração melhorada que é utilizada pelo algoritmo de alocação de bancos de capacitores. A alocação de bancos foi realizada com a aplicação de um algoritmo que considera os menores níveis de tensão que ocorrem nas barras mais distantes da subestação e o acúmulo de demanda reativa na barra, pois através da alocação de bancos de capacitores foi possível ajustar o nível de tensão e reduzir perdas de potência ativa.

A diversificação do resultado obtida pela perturbação dos pesos dos ramos fez com que pudessem ser geradas outras topologias radiais, o que possibilitou maior exploração do espaço de busca, pois através deste procedimento foram construídas soluções a partir de diferentes pontos de partida e com a aplicação da metodologia foi possível gerar soluções de qualidade que se aproximem de um ótimo global.

Diante do procedimento a evolução da aplicação é verificada pelo cálculo da função objetivo que indica a redução do custo de operação do sistema a cada etapa. Isso significa foi possível obter um sistema radial que opere de forma econômica.

## REFERÊNCIAS

- AMASIFEN, J. C. C.; ROMERO, R.; MANTOVANI, J. R. S. Algoritmos evolutivos dedicados à reconfiguração de redes radiais de distribuição sob demandas fixas e variáveis – Estudo dos operadores genéticos e parâmetros de controle. **Controle & Automação**, Campinas, v. 16, n. 3, p. 303-317, 2005.
- AUGUGLIARO, A.; DUSONCHET, L.; FAVUZA, S.; SANSEVERINO, E. R. Voltage regulation and power losses minimization in automated distribution networks by a evolutionary multiobjective approach. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 19, n. 3, p. 1516-1527, 2004.
- BARAN, M. E.; WU, F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 4, n. 1, p. 725-734, 1989a.
- BARAN, M. E.; WU, F. Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 4, n. 1, p. 735-743, 1989b.
- BORGES, M. C. O.; FRANCO, J. F.; RIDER, M. J. Optimal reconfiguration of electrical distribution systems using mathematical programming. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, Berlin, v. 25, n. 1, p. 103–111, 2014.
- BUENO, E. A. **Redução de perdas técnicas através de reconfigurações de redes de distribuição de energia elétrica sob demandas variáveis**. 2005. 148 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- CARREÑO, E.; 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: Part 1: A new formulation and a solution methodology. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 5, n. 4, 1990a.
- CHIANG, H.; JEAN-JUMEAU, R. Optimal network reconfigurations in distribution systems: Part 2: Solution algorithms and numerical results. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 5, n. 3, 1990b.
- CHIANG, H. P.; CHANG, C. F; SU, C. T. Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 5, n. 3, p. 1568-1574, 1990.
- CIVANLAR, S.; GRAINGER, J. J.; YIN, H.; LEE, S. S. H. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 3, n. 3, p. 1217–1223, 1988.

ELDURSSI, A. M.; O'CONNELL, R. M. A fast nondominated sorting guided genetic algorithm for multi-objective power distribution system reconfiguration problem. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 30, n. 2, p. 593-601, 2015.

FARAHANI, V.; VAHIDI, B.; ABYANEH, H. A. Reconfiguration and capacitor placement simultaneously for energy loss reduction based on an improved reconfiguration method. **IEEE Transactions Power Systems**, New York, v. 27, n. 2, p. 587-595, 2012.

FEO, T.; RESENDE, M. Greedy randomized adaptive search procedures. **Journal of Global Optimization**, Berlin, v. 6, n. 2, p. 109–133, 1995.

FLEURENT, C.; GLOVER, F. Improved constructive multistart strategies for the quadratic assignment problem using adaptive memory. **Journal on Computing**, Berlin, v. 11, n. 2, p. 198–204, 1999.

FRANCO, J.; LAVORATO, M.; RIDER, M. J.; ROMERO, R. An efficient implementation of tabu search in feeder reconfiguration of distribution systems. In: IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, 15., 2012, San Diego. **Proceedings...** San Diego: PESGM, 2012. p. 1-8.

GLAMOCANIN, V. Optimal loss reduction of distributed networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 5, n. 3, p. 774–782, 1990.

GOMES, F.; CARNEIRO S., J.; PEREIRA, J.; VINAGRE, M.; GARCIA, P.; ARAUJO, L. 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.; BASU, S. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 7, n. 3, p. 1484–1491, 1992.

GUIMARÃES, M. **Sistema integrado de operação de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando meta-heurísticas**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade de Campinas, Campinas, 2009.

HELD, M.; KARP, R. M. The traveling-salesman problem and minimum spanning trees. **Operations Research**, Baltimore, v. 18, n. 6, p. 1138–1162, 1970.

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.

JIANG, D.; BALDICK, R. Optimal Electric Distribution System Switch Reconfiguration and Capacitor Control. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 11, n. 2, p. 890-897, 1996.

KOCHENBERGER, G. A.; MCCARL, B. A.; WYMAN, F. P. A heuristic for general integer Programming. **Decision Sciences**, Atlanta, v. 5, n. 1, p. 36–44, 1974.

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. 26, n. 4, p. 172-180, 2012.

LEE, R. E.; BROOKS, C. L. A method and its application to evaluate automated distribution control. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 3, n. 3, p. 1232-1240, 1988.

LÓPEZ, E.; OPAZO, H.; GARCÍA, L.; BASTARD, P. Online reconfiguration considering variability demand: applications to real networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 19, n. 1, p. 549-553, 2004.

MANTOVANI, J. R.; CASARI, F.; ROMERO, R. A. Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. **Controle & Automação**, Campinas, p. 150-159, 2000.

MARTÍ, R. **Procedimientos meta-heurísticos en optimización combinatoria**. Disponível em: <<https://www.uv.es/rmarti/paper/docs/heur1.pdf>>. Acesso em: 21 jan. 2016.

MARTÍ, R. **Multi-start methods**. Disponível em: <<https://www.uv.es/rmarti/paper/docs/multi4.pdf>>. Acesso em: 21 jan. 2016.

MENDOZA, J.; MORALES, D.; LOPEZ, R.; LOPEZ, E.; VANNIER, J. C.; COELLO, C. Multiobjective location of automatic voltage regulators in a radial distribution network using a micro genetic algorithm. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 22, n. 1, p. 404-412, 2007.

MERLIN, A.; BACK, H. Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system. In: POWER SYSTEM CONFERENCE (PSCC), 15., 1975, Cambridge, **Proceedings**... Cambridge: 1975. p. 1-18.

MUTH, J. F.; THOMPSON, G. L. (Ed.). **Industrial scheduling**. Englewood cliffs: Prentice-Hall, 1963. 387 p.

NARA, K.; SHIOSE, A.; KITAGAWA, M.; ISHIHARA, T. Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum re-configuration. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 7, n. 3, p. 1044-1051, 1992.

OLIVEIRA, M. **Reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição usando a meta-heurística GRASP**. 2011. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

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**. 2015. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2015.

RIBEIRO, E. T. A. **Modelos de programação inteira mista para alocação ótima de bancos de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica radiais**. 2013. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

SENJU, S.; TOYODA, Y. An approach to linear programming with 0-1 variables. **Management Science**, Providence, v. 15, n.4, p. B196-B207, 1968.

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W.; SEMLYEN, A.; LUO, G. X. 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.

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.

SOUZA, S. S. F. d. **Algoritmo GRASP especializado aplicado ao problema de reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição radial**. 2013. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

TINNEY, W. F. Compensation methods for network solutions by optimally ordered triangular factorization. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. PAS-91, n. 1, p. 123-127, 1972.

## ANEXO A – DADOS DOS SISTEMAS

### A.1 Sistema de 14 barras

Barra ou nó de referência: 14 (Subestação)

Tensão base do sistema: 23,0 kV

Potência base: 100.000 kVA

Tabela 20 – Dados do sistema – 14 barras.

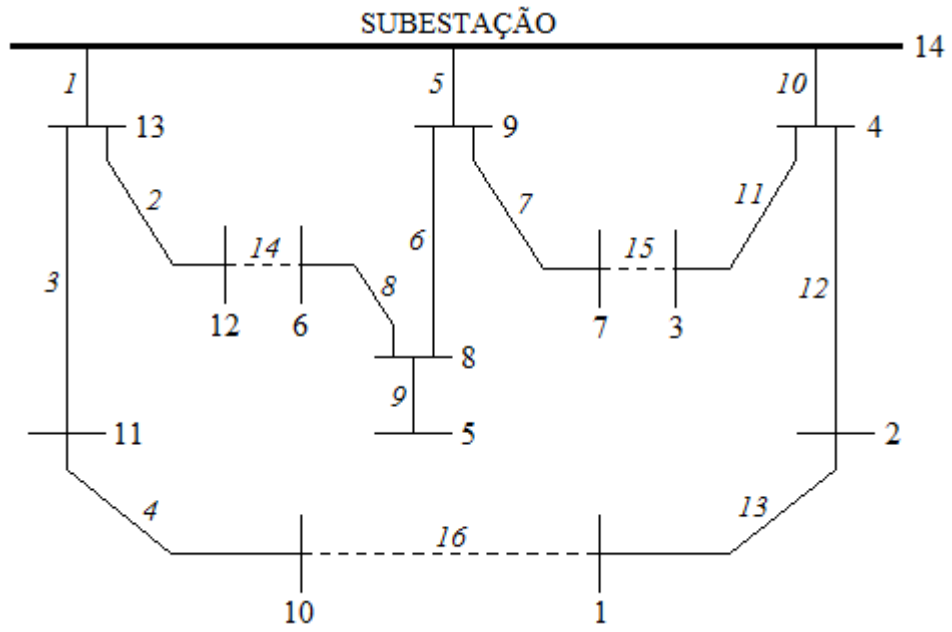
Ramo	De	Para	Carga barra final (kW)	Carga barra final (kVAr)	Resistência do ramo (%)	Reatância do ramo (%)	FP Ativa (kW)
1	14	13	2.100,00	1.000,00	7,50	10,00	10.702,7254
2	13	12	1.000,00	900,00	8,00	11,00	5.880,5778
3	13	11	1.000,00	700,00	9,00	18,00	2.730,5635
4	11	10	1.000,00	900,00	4,00	4,00	723,3278
5	14	9	4.500,00	2.000,00	11,00	11,00	10.959,2720
6	9	8	600,00	100,00	8,00	11,00	7.320,6940
7	9	7	1.000,00	900,00	11,00	11,00	498,8546
8	8	6	5.000,00	3.000,00	11,00	11,00	2.242,8449
9	8	5	4.000,00	2.700,00	8,00	11,00	4.519,3480
10	14	4	1.500,00	1.200,00	11,00	11,00	7.464,2614
11	4	3	2.000,00	800,00	9,00	12,00	2.506,7177
12	4	2	3.000,00	1.500,00	8,00	11,00	3.893,9229
13	2	1	2.000,00	1.600,00	4,00	4,00	2.881,4809
14	12	6	0,00	0,00	4,00	4,00	2.852,1870
15	7	3			4,00	4,00	1.499,3087
16	10	1			9,00	12,00	777,3221

Fonte: Adaptado de Civanlar et al. (1988).

A adaptação realizada neste sistema foi a retirada de toda a demanda capacitiva das barras e a inclusão da coluna de fluxo de potência ativa nos ramos (pesos) para ser utilizado no exemplo de aplicação.

### A.1.1 Diagrama unifilar do sistema 14 barras.

Figura 28 – Sistema de 14 barras.



Fonte: próprio autor.

## A.2 Sistema de 69 barras

Barra ou nó de referência: 1 (Subestação)

Tensão base do sistema: 12,66 kV

Potência base: 100.000 kVA

Tabela 21 – Dados do sistema – 69 barras.

Ramo	De	Para	Carga barra final (kW)	Carga barra final (kVAr)	Resistência do ramo ( $\Omega$ )	Reatância do ramo ( $\Omega$ )	Fluxo de potência ativa (kW)
1	1	2	0,00	0,00	0,00	0,00	3.888,2042
2	2	3	0,00	0,00	0,00	0,00	3.888,1331
3	3	4	0,00	0,00	0,00	0,00	3.796,5240
4	4	5	0,00	0,00	0,00	0,00	2.957,1112
5	5	6	0,00	0,00	0,03	0,03	1.549,7760
6	6	7	0,00	0,00	0,37	0,19	1.549,3493
7	7	8	2,60	2,20	0,38	0,19	1.540,5271
8	8	9	40,40	30,00	0,09	0,05	1.493,6734
9	9	10	75,00	54,00	0,05	0,03	1.373,1010
10	10	11	30,00	22,00	0,82	0,27	572,5099
11	11	12	28,00	19,00	0,19	0,06	542,6387
12	12	13	145,00	104,00	0,71	0,24	563,5786
13	13	14	145,00	104,00	1,03	0,34	360,7384
14	14	15	8,00	5,50	1,04	0,35	41,0995
15	15	16	8,00	5,50	1,0580	0,3496	49,1964
16	16	17	0,00	0,00	0,1966	0,0650	390,7874
17	17	18	45,50	30,00	0,3744	0,1238	345,0106
18	18	19	60,00	35,00	0,0047	0,0016	284,6001
19	19	20	60,00	35,00	0,3276	0,1083	224,5960
20	20	21	0,00	0,00	0,2106	0,0696	224,4382
21	21	22	1,00	0,60	0,3416	0,1129	223,3368
22	22	23	114,00	81,00	0,0140	0,0046	501,3218
23	23	24	5,30	3,50	0,1591	0,0526	495,9897
24	24	25	0,00	0,00	0,3463	0,1145	495,6330
25	25	26	28,00	20,00	0,7488	0,2475	466,8565
26	26	27	0,00	0,00	0,3089	0,1021	465,3706
27	27	28	14,00	10,00	0,1732	0,0572	450,7551
28	3	29	14,00	10,00	0,0044	0,0108	91,5381
29	29	30	26,00	18,60	0,0640	0,1565	65,5378
30	30	31	26,00	18,60	0,3978	0,1315	39,5352
31	31	32	0,00	0,00	0,0702	0,0232	39,5293
32	32	33	0,00	0,00	0,3510	0,1160	39,5283

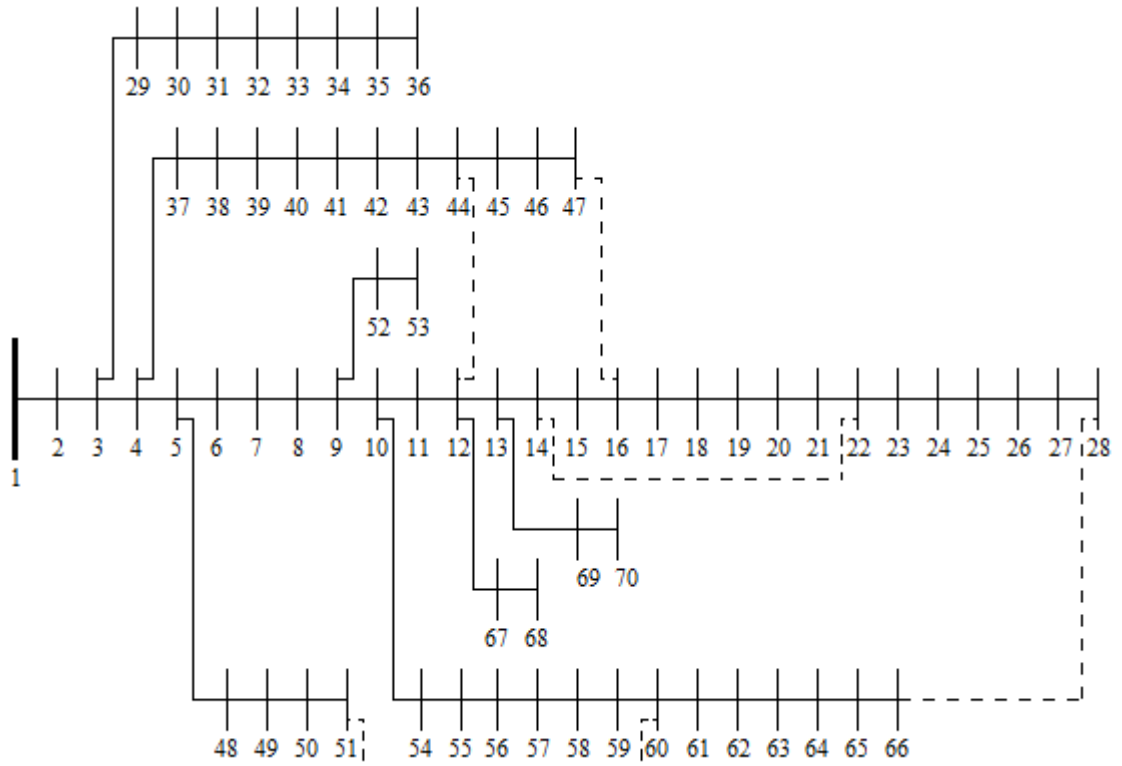
Tabela A.2 – Continuação – Dados do sistema de 69 barras.

Ramo	De	Para	Carga barra final (kW)	Carga barra final (kVar)	Resistência do ramo ( $\Omega$ )	Reatância do ramo ( $\Omega$ )	Fluxo de potência ativa (kW)
36	4	37	6,00	4,00	0,0044	0,0108	839,3992
37	37	38	26,00	18,55	0,0640	0,1565	813,3635
38	38	39	26,00	18,55	0,1053	0,1230	786,8729
39	39	40	0,00	0,00	0,0304	0,0305	786,1111
40	40	41	24,00	17,00	0,0018	0,0021	761,8911
41	41	42	24,00	17,00	0,7283	0,8509	737,8788
42	42	43	1,20	1,00	0,3100	0,3623	731,9661
43	43	44	0,00	0,00	0,0410	0,0478	729,9664
44	44	45	6,00	4,30	0,0092	0,0116	521,0324
45	45	46	0,00	0,00	0,1089	0,1373	521,0057
46	46	47	39,22	26,30	0,0009	0,0012	481,4692
47	5	48	39,22	26,30	0,0034	0,0084	1.407,2185
48	48	49	0,00	0,00	0,0851	0,2083	1.407,1371
49	49	50	79,00	56,40	0,2898	0,7091	1.326,1001
50	50	51	384,70	274,50	0,0822	0,2011	935,1280
51	9	52	384,70	274,50	0,0928	0,0473	44,1018
52	52	53	40,50	28,30	0,3319	0,1114	3,6000
53	10	54	3,60	2,70	0,1740	0,0886	769,9378
54	54	55	4,35	3,50	0,2030	0,1034	764,8638
55	55	56	26,40	19,00	0,2842	0,1447	737,6299
56	56	57	24,00	17,20	0,2813	0,1433	712,5522
57	57	58	0,00	0,00	1,5900	0,5337	711,5584
58	58	59	0,00	0,00	0,7837	0,2630	705,9499
59	59	60	0,00	0,00	0,3042	0,1006	703,1855
60	60	61	100,00	72,00	0,3861	0,1172	1.140,7917
61	61	62	0,00	0,00	0,5075	0,2585	1.135,6158
62	62	63	1.244,00	888,00	0,0974	0,0496	115,1876
63	63	64	32,00	23,00	0,1450	0,0738	147,1975
64	64	65	0,00	0,00	0,7105	0,3619	147,2227
65	65	66	227,00	162,00	1,0410	0,5302	374,3464
66	12	67	59,00	42,00	0,2012	0,0611	36,0026
67	67	68	18,00	13,00	0,0047	0,0014	18,0000
68	13	69	18,00	13,00	0,7394	0,2444	56,0227
69	69	70	28,00	20,00	0,0047	0,0016	28,0000
70	12	44	28,00	20,00	0,5000	0,5000	202,3251
71	14	22	-	-	0,5000	0,5000	392,8442
72	16	47	-	-	1,0000	1,0000	440,0956
73	51	60	-	-	2,0000	2,0000	549,4342
74	28	66	-	-	1,0000	1,0000	436,4322

Fonte: Guimarães (2009).

### A.1.2 Diagrama unifilar do sistema 69 barras

Figura 29 – Sistema de 69 barras.



Fonte: próprio autor.

## A.3 Sistema de 84 barras

Barra ou nó de referência: 84 (Subestação)

Tensão base do sistema: 11,4 kV

Potência base: 100.000 kVA

Tabela 22 – Dados do sistema – 84 barras.

Ramo	de	para	Carga barra final (kW)	Carga barra final (kVar)	Resistência do ramo ( $\Omega$ )	Reatância do ramo ( $\Omega$ )	Fluxo de potência ativa (kW)
1	84	1	0,0	0,0	0,1944	0,6624	2.883,9406
2	1	2	100,0	50,0	0,2096	0,4304	2.883,9406
3	2	3	300,0	200,0	0,2358	0,4842	2.745,8950
4	3	4	350,0	250,0	0,0917	0,1883	2.356,9794
5	4	5	220,0	100,0	0,2096	0,4304	1.918,6956
6	5	6	1.100,0	800,0	0,0393	0,0807	1.632,4874
7	6	7	400,0	320,0	0,0405	0,1380	275,1565
8	7	8	300,0	200,0	0,1048	0,2152	360,7809
9	7	9	300,0	230,0	0,2358	0,4842	378,6010
10	7	10	300,0	260,0	0,1048	0,2152	397,2804
11	11	84	0,9	0,0	0,0786	0,1614	3.844,9192
12	11	12	1.200,0	800,0	0,3406	0,6944	4.203,2090
13	12	13	800,0	600,0	0,0262	0,0538	602,0557
14	12	14	700,0	500,0	0,0786	0,1614	899,7665
15	15	84	0,0	0,0	0,1134	0,3864	3.758,9827
16	15	16	300,0	150,0	0,0524	0,1076	3.758,9827
17	16	17	500,0	350,0	0,0524	0,1076	4.995,8728
18	17	18	700,0	400,0	0,1572	0,3228	4.364,8729
19	18	19	1.200,0	1.000,0	0,0393	0,0807	3.553,4174
20	19	20	300,0	300,0	0,1703	0,3497	1.989,6968
21	20	21	400,0	350,0	0,2358	0,4842	681,9506
22	21	22	50,0	20,0	0,1572	0,3228	53,8581
23	21	23	50,0	20,0	0,1965	0,4035	104,4350
24	23	24	50,0	10,0	0,1310	0,2690	50,9941
25	25	84	50,0	30,0	0,0567	0,1932	3.747,3965
26	25	26	100,0	60,0	0,1048	0,2152	3.689,2650
27	26	27	100,0	70,0	0,2489	0,5111	1.974,3608
28	27	28	1.800,0	1.300,0	0,0486	0,1656	1.836,9830
29	28	29	200,0	120,0	0,1310	0,2690	469,8607
30	30	84	0,0	0,0	0,1965	0,3960	3.526,1285
31	30	31	1.800,0	1.600,0	0,1310	0,2690	3.526,1285
32	31	32	200,0	150,0	0,1310	0,2690	1.126,2673

Tabela A.3 – Continuação – Dados do sistema de 84 barras.

Ramo	de	para	Carga barra final (kW)	Carga barra final (kVar)	Resistência do ramo ( $\Omega$ )	Reatância do ramo ( $\Omega$ )	Fluxo de potência ativa (kW)
33	32	33	200,0	100,0	0,0262	0,0538	35,5310
34	33	34	800,0	600,0	0,1703	0,3497	235,4787
35	34	35	100,0	60,0	0,0524	0,1076	400,0365
36	35	36	100,0	60,0	0,4978	1,0222	283,3027
37	36	37	20,0	10,0	0,0393	0,0807	166,0948
38	37	38	20,0	10,0	0,0393	0,0807	143,8637
39	38	39	20,0	10,0	0,0786	0,1614	97,9787
40	39	40	20,0	10,0	0,2096	0,4304	116,8551
41	38	41	200,0	160,0	0,1965	0,4035	219,4362
42	41	42	50,0	30,0	0,2096	0,4304	37,2982
43	43	84	0,0	0,0	0,0486	0,1656	3.385,8085
44	43	44	30,0	20,0	0,0393	0,0807	3.019,1841
45	44	45	800,0	700,0	0,1310	0,2690	2.977,5315
46	45	46	200,0	150,0	0,2358	0,4842	1.899,0305
47	47	84	0,0	0,0	0,2430	0,8280	3.891,2978
48	47	48	0,0	0,0	0,0655	0,1345	3.891,2978
49	48	49	0,0	0,0	0,0655	0,1345	3.875,2124
50	49	50	200,0	160,0	0,0393	0,0807	3.859,1458
51	50	51	800,0	600,0	0,0786	0,1614	3.593,7006
52	51	52	500,0	300,0	0,0393	0,0807	2.577,3057
53	52	53	500,0	350,0	0,0786	0,1614	1.991,8016
54	53	54	500,0	300,0	0,0524	0,1076	754,1594
55	54	55	200,0	80,0	0,1310	0,2690	174,9218
56	56	84	0,0	0,0	0,2268	0,7728	2.623,7786
57	56	57	30,0	20,0	0,5371	1,1029	2.623,7786
58	57	58	600,0	420,0	0,0524	0,1076	2.529,4141
59	58	59	0,0	0,0	0,0405	0,1380	1.791,5386
60	59	60	20,0	10,0	0,0393	0,0807	1.788,5739
61	60	61	20,0	10,0	0,0262	0,0538	385,8136
62	61	62	200,0	130,0	0,1048	0,2152	363,4054
63	62	63	300,0	240,0	0,2358	0,4842	126,7493
64	63	64	300,0	200,0	0,0243	0,0828	267,1426
65	65	84	0,0	0,0	0,0486	0,1656	2.249,1487
66	65	66	50,0	30,0	0,1703	0,3497	2.249,1487
67	66	67	0,0	0,0	0,1215	0,4140	2.177,7501
68	67	68	400,0	360,0	0,2187	0,7452	2.164,2209
69	68	69	0,0	0,0	0,0486	0,1656	1.601,9883
70	69	70	0,0	0,0	0,0729	0,2484	1.598,9888
71	70	71	2.000,0	1.500,0	0,0567	0,1932	1.594,4954

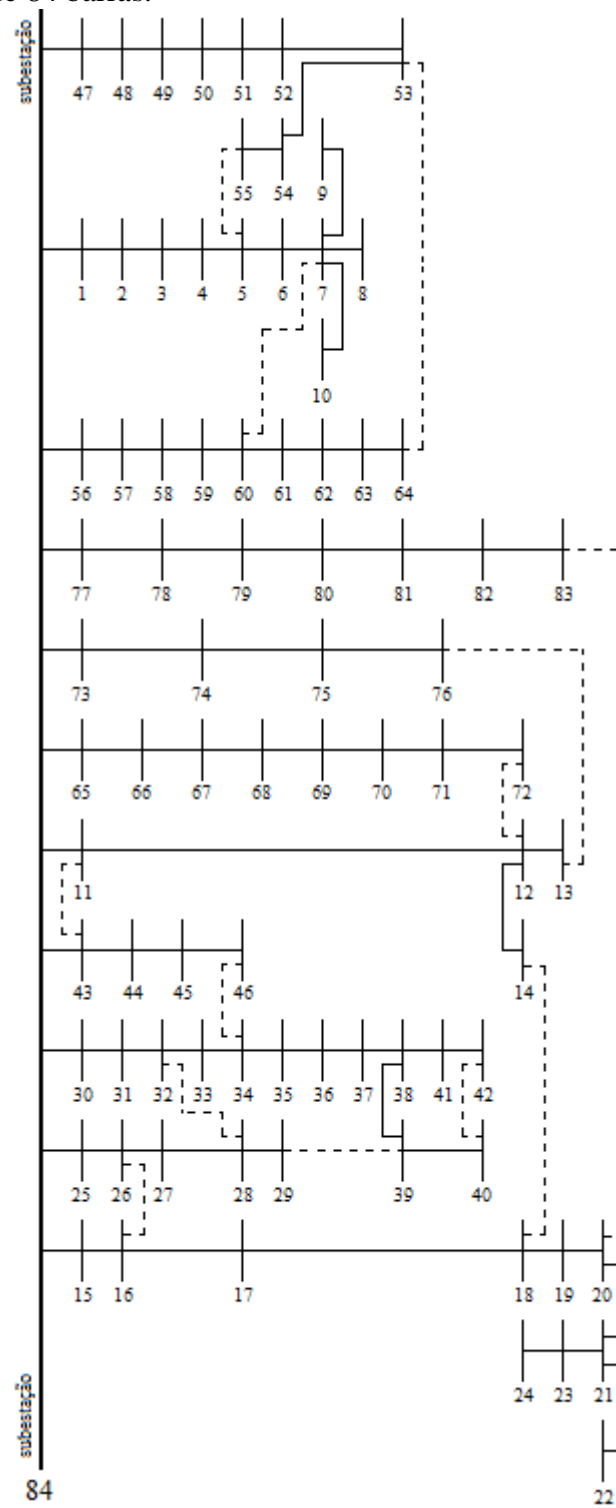
Tabela A.3 – Continuação – Dados do sistema de 84 barras.

Ramo	de	para	Carga barra final (kW)	Carga barra final (kVar)	Resistência do ramo ( $\Omega$ )	Reatância do ramo ( $\Omega$ )	Fluxo de potência ativa (kW)
72	71	72	200,00	150,00	0,0262	0,0528	915,5951
73	73	84	0,00	0,00	0,3240	1,1040	2.301,7304
74	73	74	0,00	0,00	0,0324	0,1104	2.301,7304
75	74	75	1.200,00	950,00	0,0567	0,1932	2.297,6938
76	75	76	300,00	180,00	0,0486	0,1656	761,3632
77	77	84	0,00	0,00	0,2511	0,8556	3.592,0668
78	77	78	400,00	360,00	0,1296	0,4416	3.592,0668
79	78	79	2.000,00	1.300,00	0,0486	0,1656	3.016,3137
80	79	80	200,00	140,00	0,1310	0,2640	654,0549
81	80	81	500,00	360,00	0,1310	0,2640	429,1470
82	81	82	100,00	30,00	0,0917	0,1883	315,3357
83	82	83	400,00	360,00	0,3144	0,6456	414,3260
84	5	55	0,00	0,00	0,1310	0,2690	89,5600
85	7	60	-	-	0,1310	0,2690	1.376,9520
86	11	43	-	-	0,1310	0,2690	370,6154
87	12	72	-	-	0,3406	0,6994	1.172,4528
88	13	76	-	-	0,4585	0,9415	421,9036
89	14	18	-	-	0,5371	1,0824	39,5467
90	16	26	-	-	0,0917	0,1883	1.596,2419
91	20	83	-	-	0,0786	0,1614	893,5711
92	28	32	-	-	0,0524	0,1076	887,5468
93	29	39	-	-	0,0786	0,1614	236,7062
94	34	46	-	-	0,0262	0,0538	1.634,5169
95	40	42	-	-	0,1965	0,4035	94,7592
96	53	64	-	-	0,0393	0,0807	623,6547

Fonte: Chiou, Chang e Su (2005).

### A.1.3 Diagrama unifilar do sistema 84 barras

Figura 30 – Sistema de 84 barras.



Fonte: próprio autor.

## A.4 Sistema de 136 barras

Barra ou nó de referência: 136 (Subestação)

Tensão base do sistema: 13,8 kV

Potência base: 100.000 kVA

Tabela 23 – Dados do sistema – 135 barras.

Ramo	de	para	Carga barra final (kW)	Carga barra final (kVar)	Resistência do ramo ( $\Omega$ )	Reatância do ramo ( $\Omega$ )	Fluxo de potência ativa (kW)
1	136	1	0,000	0,0000	0,33205	0,76653	2.445,3955
2	1	2	47,780	19,0090	0,00188	0,00433	2.432,7431
3	2	3	42,551	16,9290	0,22324	0,51535	2.384,8914
4	3	4	87,022	34,6220	0,09943	0,22953	2.334,1583
5	4	5	311,310	123,8550	0,15571	0,35945	2.243,6190
6	5	6	148,869	59,2280	0,16321	0,37677	1.927,1974
7	6	7	238,672	94,9560	0,11444	0,26417	381,9530
8	6	8	62,299	24,7860	0,05675	0,05666	1.392,3828
9	8	9	124,598	49,5710	0,52124	0,27418	23,0525
10	8	10	140,175	55,7680	0,10877	0,10860	1.352,3791
11	10	11	116,813	46,4740	0,39803	0,20937	116,8479
12	10	12	249,203	99,1450	0,91744	0,31469	249,5694
13	10	13	291,447	115,9520	0,11823	0,11805	844,4486
14	13	14	303,720	120,8350	0,50228	0,26421	304,0182
15	13	15	215,396	85,6950	0,05675	0,05666	248,3967
16	15	16	198,586	79,0070	0,29379	0,15454	198,6605
17	136	17	0,000	0,0000	0,33205	0,76653	2.670,3791
18	17	18	0,000	0,0000	0,00188	0,00433	2.655,1269
19	18	19	0,000	0,0000	0,22324	0,51535	2.655,0406
20	19	20	30,127	14,7290	0,10881	0,25118	2.644,7864
21	20	21	230,972	112,9200	0,71078	0,37388	231,2292
22	20	22	60,256	29,4580	0,18197	0,42008	2.378,4322
23	22	23	230,972	112,9200	0,30326	0,15952	231,0826
24	22	24	120,507	58,9150	0,02439	0,05630	2.080,3272
25	24	25	0,000	0,0000	0,04502	0,10394	1.811,4376
26	25	26	56,981	27,8570	0,01876	0,04331	1.175,5257
27	26	27	364,665	178,2810	0,11823	0,11805	1.118,3603
28	27	28	0,000	0,0000	0,02365	0,02361	752,6411
29	28	29	124,647	60,9390	0,18954	0,09970	181,6799
30	29	30	56,981	27,8570	0,39803	0,20937	56,9899
31	28	31	0,000	0,0000	0,05675	0,05666	570,8637
32	31	32	85,473	41,7870	0,09477	0,04985	482,9366

Tabela A.4 – Continuação – Dados do sistema de 136 barras.

Ramo	de	para	Carga barra final (kW)	Carga barra final (kVar)	Resistência do ramo ( $\Omega$ )	Reatância do ramo ( $\Omega$ )	Fluxo de potência ativa (kW)
33	32	33	0,000	0,0000	0,41699	0,21934	397,3116
34	33	34	396,735	193,9600	0,11372	0,05982	396,8586
35	31	35	0,000	0,0000	0,07566	0,07555	87,7897
36	35	36	181,152	88,5630	0,36960	0,19442	423,8883
37	36	37	242,172	118,3950	0,26536	0,13958	242,2794
38	35	38	75,316	36,8210	0,05675	0,05666	336,1054
39	136	39	0,000	0,0000	0,33205	0,76653	3.127,4050
40	39	40	1,254	0,5310	0,11819	0,27283	3.106,6665
41	40	41	6,274	2,6600	2,96288	1,01628	6,2747
42	40	42	0,000	0,0000	0,00188	0,00433	3.091,7561
43	42	43	117,880	49,9710	0,06941	0,16024	3.091,6393
44	43	44	62,668	26,5660	0,81502	0,42872	62,6886
45	43	45	172,285	73,0340	0,06378	0,14724	2.906,7565
46	45	46	458,556	194,3880	0,13132	0,30315	2.730,9539
47	46	47	262,962	111,4730	0,06191	0,14291	2.265,9831
48	47	48	235,761	99,9420	0,11444	0,26417	430,9057
49	48	49	0,000	0,0000	0,28374	0,28331	39,6214
50	49	50	109,215	46,2980	0,28374	0,28331	39,6176
51	48	51	0,000	0,0000	0,04502	0,10394	155,3437
52	51	52	72,809	30,8650	0,02626	0,06063	790,1384
53	52	53	258,473	109,5700	0,06003	0,13858	231,5757
54	53	54	69,169	29,3220	0,03002	0,06929	26,9233
55	54	55	21,843	9,2600	0,02064	0,04764	96,0978
56	52	56	0,000	0,0000	0,10881	0,25118	485,6404
57	56	57	20,527	8,7020	0,25588	0,13460	485,4727
58	57	58	150,548	63,8190	0,41699	0,21934	464,5512
59	58	59	220,687	93,5520	0,50228	0,26421	313,4137
60	59	60	92,384	39,1630	0,33170	0,17448	92,4026
61	60	61	0,000	0,0000	0,20849	0,10967	0,0000
62	47	62	226,693	96,0980	0,13882	0,32047	246,5351
63	136	63	0,000	0,0000	0,00750	0,01732	2.060,0647
64	63	64	294,016	116,9740	0,27014	0,62362	2.059,8643
65	64	65	83,015	33,0280	0,38270	0,88346	1.758,6292
66	65	66	83,015	33,0280	0,33018	0,76220	1.668,0683
67	66	67	103,770	41,2850	0,32830	0,75787	949,3133
68	67	68	176,408	70,1840	0,17072	0,39409	843,5978
69	68	69	83,015	33,0280	0,55914	0,29412	83,0396
70	68	70	217,917	86,6980	0,05816	0,13425	583,3442
71	70	71	23,294	9,2670	0,70130	0,36890	28,3728

Tabela A.4 – Continuação – Dados do sistema de 136 barras.

Ramo	de	para	Carga barra final (kW)	Carga barra final (kVar)	Resistência do ramo ( $\Omega$ )	Reatância do ramo ( $\Omega$ )	Fluxo de potência ativa (kW)
72	71	72	5,075	2,0190	1,02352	0,53839	5,0752
73	70	73	72,638	28,8990	0,06754	0,15591	336,9204
74	73	74	405,990	161,5235	1,32352	0,45397	407,3947
75	136	75	0,000	0,0000	0,01126	0,02598	1.720,4775
76	75	76	100,182	42,4680	0,72976	1,68464	1.720,2685
77	76	77	142,523	60,4170	0,22512	0,51968	1.226,5217
78	77	78	96,042	40,7130	0,20824	0,48071	1.305,9927
79	78	79	300,454	127,3660	0,04690	0,10827	1.207,6687
80	79	80	141,238	59,8730	0,61950	0,61857	1.080,0488
81	80	81	279,847	118,6310	0,34049	0,33998	934,6108
82	81	82	87,312	37,0130	0,56862	0,29911	87,3404
83	81	83	243,849	103,3710	0,10877	0,10860	565,7018
84	83	84	247,750	105,0250	0,56862	0,29911	155,9452
85	136	85	0,000	0,0000	0,01126	0,02598	2.514,4876
86	85	86	89,878	38,1010	0,41835	0,96575	2.514,0402
87	86	87	1.137,280	482,1080	0,10499	0,13641	1.138,1425
88	86	88	458,339	194,2960	0,43898	1,01338	1.269,3993
89	88	89	385,197	163,2900	0,07520	0,02579	806,5350
90	89	90	0,000	0,0000	0,07692	0,17756	421,0220
91	90	91	79,608	33,7470	0,33205	0,76653	1.368,1955
92	91	92	87,312	37,0130	0,08442	0,19488	518,2217
93	92	93	0,000	0,0000	0,13320	0,30748	798,3930
94	93	94	74,001	31,3700	0,29320	0,29276	345,3116
95	94	95	232,050	98,3690	0,21753	0,21721	271,1014
96	95	96	141,819	60,1190	0,26482	0,26443	38,9574
97	93	97	0,000	0,0000	0,10318	0,23819	452,4962
98	97	98	76,449	32,4080	0,13507	0,31181	452,3286
99	136	99	0,000	0,0000	0,00938	0,02165	2.194,5864
100	99	100	51,322	21,7560	0,16884	0,38976	2.194,2991
101	100	101	59,874	25,3810	0,11819	0,27283	2.137,8048
102	101	102	9,065	3,8430	2,28608	0,78414	9,0662
103	101	103	2,092	0,8870	0,45587	1,05236	2.065,4098
104	103	104	16,735	7,0940	0,69600	1,60669	855,9699
105	104	105	1.506,522	638,6340	0,45774	1,05669	1.356,7830
106	105	106	313,023	132,6940	0,20298	0,26373	155,6768
107	106	107	79,831	33,8420	0,21348	0,27737	468,7320
108	107	108	51,322	21,7560	0,54967	0,28914	460,1163
109	108	109	0,000	0,0000	0,54019	0,28415	250,8302
110	107	110	202,435	85,8150	0,04550	0,05911	1.008,9449

Tabela A.4 – Continuação – Dados do sistema de 136 barras.

Ramo	de	para	Carga barra final (kW)	Carga barra final (kVar)	Resistência do ramo ( $\Omega$ )	Reatância do ramo ( $\Omega$ )	Fluxo de potência ativa (kW)
111	110	111	60,823	25,7840	0,47385	0,24926	106,4882
112	111	112	45,618	19,3380	0,86241	0,45364	45,6298
113	112	113	0,000	0,0000	0,56862	0,29911	0,0000
114	108	114	157,070	66,5840	0,77711	0,40878	157,1970
115	114	115	0,000	0,0000	1,08038	0,56830	0,0000
116	109	116	250,148	106,0410	1,09933	0,57827	250,6055
117	116	117	0,000	0,0000	0,47385	0,24926	0,0000
118	104	118	69,809	29,5930	0,32267	0,74488	316,0183
119	118	119	32,072	13,5960	0,14633	0,33779	246,0011
120	119	120	61,084	25,8940	0,12382	0,28583	213,8720
121	136	121	0,000	0,0000	0,01126	0,02598	1.852,8592
122	121	122	94,622	46,2600	0,64910	1,49842	1.852,6119
123	122	123	49,858	24,3750	0,04502	0,10394	1.743,7358
124	123	124	123,164	60,2140	0,52640	0,18056	123,2175
125	123	125	78,350	38,3040	0,02064	0,04764	1.569,7722
126	125	126	145,475	71,1210	0,53071	0,27917	234,2521
127	125	127	21,369	10,4470	0,09755	0,22520	1.725,3450
128	127	128	74,789	36,5640	0,11819	0,27283	299,1212
129	127	129	227,926	111,4310	0,13882	0,32047	1.403,0467
130	129	130	35,614	17,4110	0,04315	0,09961	1.420,2405
131	130	131	249,295	121,8770	0,09192	0,21220	1.384,0810
132	131	132	316,722	154,8420	0,16134	0,37244	1.589,8722
133	132	133	333,817	163,1990	0,37832	0,37775	831,4085
134	133	134	249,295	121,8770	0,39724	0,39664	495,9717
135	134	135	0,000	0,0000	0,29320	0,29276	246,0994
136	7	73	0,000	0,0000	0,13132	0,30315	143,1818
137	9	24	-	-	0,26536	0,13958	147,6557
138	15	83	-	-	0,14187	0,14166	165,6910
139	38	135	-	-	0,08512	0,08499	411,4612
140	25	51	-	-	0,04502	0,10394	634,9206
141	50	96	-	-	0,14187	0,14166	69,6015
142	55	98	-	-	0,14187	0,14166	117,9368
143	62	120	-	-	0,03940	0,09094	19,7774
144	66	79	-	-	0,12944	0,29882	629,8234
145	79	131	-	-	0,01688	0,03898	456,2207
146	84	135	-	-	0,33170	0,17448	91,8839
147	91	104	-	-	0,14187	0,14166	766,3009
148	90	129	-	-	0,07692	0,17756	246,8971
149	90	103	-	-	0,07692	0,17756	1.194,1599

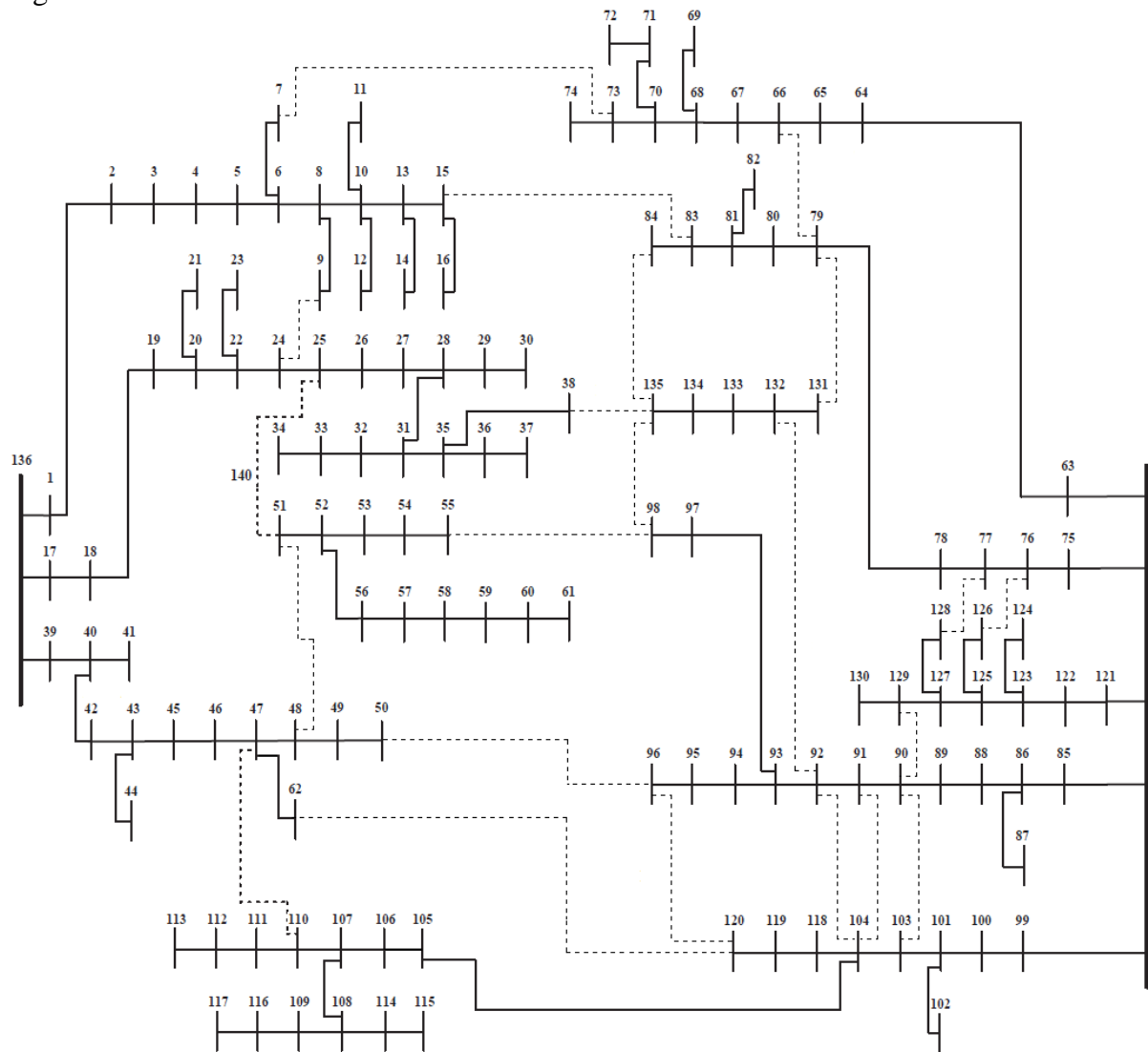
Tabela A.4 – Continuação – Dados do sistema de 136 barras.

Ramo	de	para	Carga barra final (kW)	Carga barra final (kVar)	Resistência do ramo ( $\Omega$ )	Reatância do ramo ( $\Omega$ )	Fluxo de potência ativa (kW)
150	92	104	-	-	0,07692	0,17756	71,1973
151	92	132	-	-	0,07692	0,17756	438,8481
152	96	120	-	-	0,26482	0,26443	172,4704
153	110	47	-	-	0,49696	0,64567	1.318,1517
154	126	76	-	-	0,17059	0,08973	379,8850
155	128	77	-	-	0,05253	0,12126	224,2724
156	135	98	-	-	0,29320	0,29276	257,4829

Fonte: Mantovani, Casari e Romero (2000).

### A.1.4 Diagrama unifilar do sistema 136 barras

Figura 31 – Sistema de 136 barras.



Fonte: próprio autor.