



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Campus de Ilha Solteira - SP

BRUNA PARDIM ALVES

**BUSCA TABU REFORMULADA APLICADA AO
PROBLEMA DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RADIAIS**

Ilha Solteira

2019

BRUNA PARDIM ALVES

**BUSCA TABU REFORMULADA APLICADA AO
PROBLEMA DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RADIAIS**

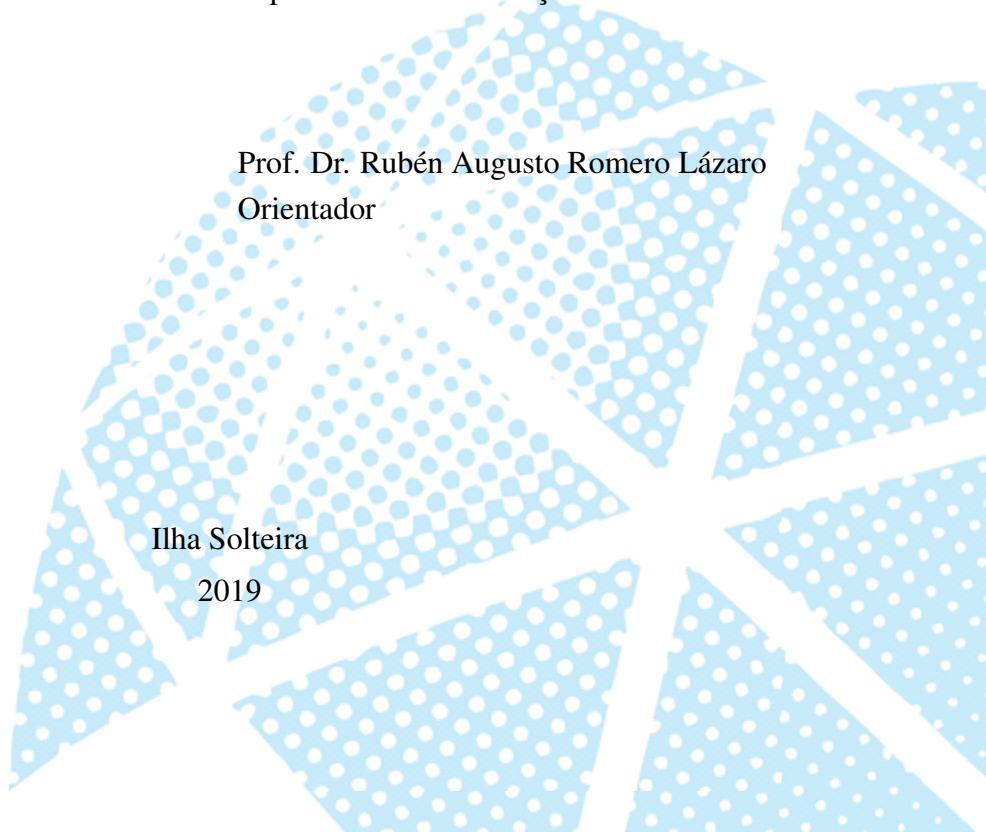
Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia do Campus de Ilha Solteira -
UNESP como parte dos requisitos para ob-
tenção do título de Mestre em Engenharia
Elétrica.

Especialidade: Automação.

Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro
Orientador

Ilha Solteira

2019



FICHA CATALOGRÁFICA

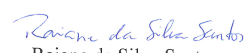
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

A474b Alves, Bruna Pardim.
Busca Tabu reformulada aplicada ao problema de operação de sistemas de distribuição de energia elétrica radiais / Bruna Pardim Alves. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019
97 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2019

Orientador: Rubén Augusto Romero Lázaro
Inclui bibliografia

1. Meta-heurística. 2. Reconfiguração de sistemas de distribuição. 3. Alocação de bancos de capacitores. 4. Prim. 5. Fluxo de potência radial. 6. Busca Tabu.


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: BUSCA TABU REFORMULADA APLICADA AO PROBLEMA DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RADIAIS

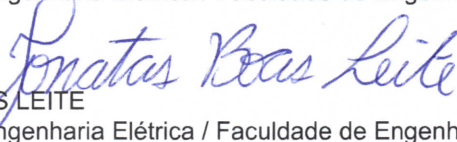
AUTORA: BRUNA PARDIM ALVES

ORIENTADOR: RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:



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



Dr. JONATAS BOAS LEITE
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 - UNIOESTE

Ilha Solteira, 31 de maio de 2019

À minha família, em especial aos meus pais Célia e Walter, ao meu marido Thiago por todo amor, apoio, confiança e incentivo em todos os momentos e ao meu filho amado Miguel que me dá forças para buscar sempre o melhor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por me iluminar e me dar forças para seguir sempre em frente com os meus objetivos.

Aos meus pais, Walter e Célia pelo carinho, incentivo, compreensão, apoio e a todo ensinamento e amor dedicados a mim.

Ao meu filho Miguel, razão da minha vida que foi gerado durante o desenvolvimento deste trabalho, ele me fez contar com doses extras de empenho e dedicação para poder conciliar pesquisa e estudos com a maternidade. É cansativo, mas não é impossível.

Agradeço, especialmente ao meu marido Thiago pelo amor, apoio, ajuda, companheirismo em todos os momentos, sem ele ao meu lado seria muito difícil chegar até o fim.

Ao Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro, pela orientação, paciência, pelo incentivo e pela confiança depositada em mim.

Aos meus colegas do Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica (LaP-SEE), em especial, Gabriel, Hugo e Letícia pelas conversas, trocas de conhecimentos e momentos de descontração.

Meus agradecimentos a todos os funcionários da FEIS-UNESP, pelos serviços prestados.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior - Brasil (CAPES) pelo apoio financeiro - Código de Financiamento 001, e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte através do Projeto Temático n. 2015/21972-6.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos

não é senão uma gota de água no mar.

Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

Madre Teresa de Calcutá

RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta baseada na meta-heurística Busca Tabu, chamada de Busca Tabu Reformulada para resolver o problema de operação ótima dos sistemas de distribuição, utilizando uma estratégia integrada de reconfiguração e alocação de bancos de capacitores fixos e chaveados para obter a topologia radial que apresente o menor custo de operação. Para encontrar a topologia radial inicial foi aplicado o algoritmo de Prim, em que foi obtida uma solução reconfigurada, e essa solução encontrada foi submetida à uma heurística para alocação de capacitores fixos e chaveados. A proposta de solução inicial é submetida ao algoritmo de Busca Tabu Reformulada que utiliza uma vizinhança que considera como solução vizinha uma topologia vizinha da topologia radial corrente e com a proposta de alocação de bancos de capacitores modificada. Como proposta da metodologia Busca Tabu Reformulada o procedimento é repetido até um critério de parada definido. Todos os programas foram escritos em linguagem FORTRAN 77. Os algoritmos propostos foram testados com os sistemas de 33, 70, 84 e 136 barras.

Palavras-chave: Meta-heurística. Reconfiguração de sistemas de distribuição. Alocação de bancos de capacitores. Prim. Fluxo de potência radial. Busca Tabu.

ABSTRACT

This paper presents a proposal based on the Tabu Search metaheuristic called Tabu Search Reformulated to solve the problem of optimal operation of the distribution systems, using an integrated strategy of reconfiguration and allocation of fixed and switched capacitor banks to obtain the radial topology which presents the lowest operating cost. To find the initial radial topology the Prim algorithm was applied, in which a reconfigured solution was obtained, and this solution was submitted to a heuristic for the allocation of fixed and switched capacitors. The initial solution proposal is submitted to the Reformulated Tabu Search algorithm that uses a neighborhood that considers as neighbor solution a neighboring topology of the current radial topology and with the proposed allocation of modified capacitor banks. As a proposal of the Tabu Search Reformulated methodology, the procedure is repeated up to a defined stop criterion. All the programs were written in FORTRAN 77 language. The proposed algorithms were tested with the 33, 70, 84 and 136-node systems.

Keywords: Meta-heuristics. Reconfiguration of distribution systems. Allocation of capacitor banks. Prim. Radial power flow. Tabu Search.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Sistema de 33 barras (Caso Base) - Exemplo	40
Figura 2	Configuração Radial do Sistema de 33 barras obtida com o algoritmo de Prim.	42
Figura 3	Sistema radial de 14 barras antes da ordenação	52
Figura 4	Sistema radial de 14 barras após a ordenação	53
Figura 5	Ramo de um sistema de distribuição	54
Figura 6	Algoritmo de fluxo de carga de varredura para redes radiais	56
Figura 7	Sistema Inicial de Distribuição (14 Barras)	59
Figura 8	Sistema Inicial de Distribuição Renumerado (14 Barras)	60
Figura 9	Sistema de 70 barras (Caso Base)	66
Figura 10	Sistema de 84 barras (Caso Base)	70
Figura 11	Sistema fracamente malhado	83
Figura 12	Representação do <i>breakpoint</i> usando injeções de correntes nodais	84
Figura 13	Equivalente multiporta da rede visto pelos <i>breakpoints</i>	84
Figura 14	Circuito equivalente de Thévenin da rede vista pelos <i>breakpoints</i>	85
Figura 15	Fluxo de carga para redes fracamente malhadas	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Representação da configuração radial inicial do sistema de 33 barras (Vetor psi)	39
Tabela 2	Índices para o algoritmo de Prim	42
Tabela 3	Representação da Proposta de Solução Inicial Radial com Alocação de Capacitores	46
Tabela 4	Dados das barras do sistema de 14 barras	57
Tabela 5	Dados dos ramos do sistema de 14 barras	57
Tabela 6	Forma do vetor $mnr()$	59
Tabela 7	Dados das barras do sistema de 14 barras renumerado	60
Tabela 8	Dados dos ramos renumerados e ordenados	61
Tabela 9	Resultados do sistema de 33 barras - caso base	63
Tabela 10	Barras com menor tensão - caso base (sistema de 33 barras)	63
Tabela 11	Resultados sistema de 33 barras - reconfigurado.	63
Tabela 12	Barras com menor tensão - Prim (sistema de 33 barras)	64
Tabela 13	Proposta de Solução Inicial (Sistema de 33 Barras) - Reconfigurada e com Alocação de Capacitores	64
Tabela 14	Barras com menor tensão - Solução Inicial (sistema de 33 barras)	64
Tabela 15	Resultados sistema de 33 barras - Solução Final	65
Tabela 16	Barras com menor tensão - Solução final (sistema de 33 barras)	65
Tabela 17	Resultados do sistema de 70 barras - caso base	67
Tabela 18	Barras com menor tensão - caso base (sistema de 70 barras)	67
Tabela 19	Resultados sistema de 70 barras - reconfigurado.	67
Tabela 20	Barras com menor tensão - Prim (sistema de 70 barras)	68

Tabela 21	Proposta de Solução Inicial (Sistema de 70 Barras) - Reconfigurada e com Alocação de Capacitores	68
Tabela 22	Barras com menor tensão - solução inicial (sistema de 70 barras) . . .	68
Tabela 23	Resultados sistema de 70 barras - Solução Final	69
Tabela 24	Barras com menor tensão - solução final (sistema de 70 barras)	69
Tabela 25	Resultados do sistema de 84 barras - caso base	70
Tabela 26	Barras com menor tensão - caso base (sistema de 84 barras)	71
Tabela 27	Resultados sistema de 84 barras - reconfigurado	71
Tabela 28	Barras com menor tensão - Prim (sistema de 84 barras)	71
Tabela 29	Proposta de Solução Inicial (Sistema de 84 Barras) - Reconfigurada e com Alocação de Capacitores	72
Tabela 30	Barras com menor tensão - solução inicial (sistema de 84 barras) . . .	72
Tabela 31	Resultados sistema de 84 barras - Solução Final	72
Tabela 32	Barras com menor tensão - solução final (sistema de 84 barras)	73
Tabela 33	Resultados do sistema de 136 barras - caso base	73
Tabela 34	Barras com menor tensão - caso base (sistema de 136 barras)	74
Tabela 35	Resultados do sistema de 136 barras - reconfigurado	74
Tabela 36	Barras com menor tensão - Prim (sistema de 136 barras)	74
Tabela 37	Proposta de Solução Inicial (Sistema de 136 Barras) - Reconfigurada e com Alocação de Capacitores	75
Tabela 38	Barras com menor tensão - solução inicial (sistema de 84 barras) . . .	75
Tabela 39	Resultados sistema de 136 barras - Solução Final	75
Tabela 40	Barras com menor tensão - solução final (sistema de 136 barras) . . .	76
Tabela 41	Dados do sistema de 33 barras	88
Tabela 42	Dados do sistema de 70 barras	89
Tabela 43	Dados do sistema de 84 barras	91
Tabela 44	Dados do sistema de 136 barras	93

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

AHC	Algoritmo Heurístico Construtivo
FC	Fluxo de Carga
FO	Função Objetivo
FP	Fluxo de Potência
PLIM	Problema de Programação Linear Inteiro Misto
PNLIM	Problema de Programação Não Linear Inteiro Misto
RSDEE	Reconfiguração de Sistemas de Energia Elétrica
TS	<i>Tabu Search</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	O PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	16
1.1.1	Modelo Matemático do Problema da Reconfiguração de Sistemas de Distribuição	17
1.1.2	Cálculo da Função Objetivo	19
1.2	O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	20
1.2.1	Modelo Matemático do Problema de Alocação de Capacitores em Sistemas de Distribuição	20
1.2.2	Cálculo da Função Objetivo	24
1.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE MODELOS MATEMÁTICOS E TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO USADAS NA RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	25
1.3.1	Heurísticas Aplicadas ao Problema de RSDEE	25
1.3.2	Meta-heurísticas Aplicadas ao Problema de RSDEE	26
1.3.3	Técnicas de Otimização Clássicas Aplicadas ao Problema de RSDEE	27
1.4	O PROBLEMA INTEGRADO DE RECONFIGURAÇÃO E ALOCAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	28
2	A META-HEURÍSTICA BUSCA TABU REFORMULADA	31
2.1	TÓPICOS FUNDAMENTAIS NA ESTRUTURA DE UMA META-HEURÍSTICA	31
2.2	FUNDAMENTOS DE BUSCA TABU	32
2.2.1	Algoritmo Busca Tabu com Memória de Curto Prazo	33
2.2.1.1	<i>CrITÉrio de aspiração</i>	33
2.2.2	Algoritmo Busca Tabu com Memória de Longo Prazo	34
2.2.2.1	<i>Memória Baseada em Frequência</i>	34

2.2.2.2	<i>Intensificação e Diversificação</i>	35
2.2.3	Estratégias adicionais utilizadas em Busca Tabu	35
2.2.3.1	<i>Configurações de Elite em Busca Tabu</i>	35
2.2.3.2	<i>Oscilação Estratégica</i>	35
2.2.3.3	<i>Path Relinking</i>	36
2.2.4	A Formulação Básica de TS	36
2.3	A BUSCA TABU REFORMULADA	37
3	PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO USANDO A BUSCA TABU	39
3.1	REPRESENTAÇÃO DE UMA PROPOSTA DE SOLUÇÃO RADIAL	39
3.2	GERAÇÃO EFICIENTE DE UMA TOPOLOGIA RADIAL INICIAL COM ALOCAÇÃO DE CAPACITORES	40
3.2.1	Algoritmo de Prim	40
3.2.2	Heurística para Alocação de Bancos de Capacitores	43
3.2.2.1	<i>Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC)</i>	43
3.2.3	Representação de uma Proposta de Solução Radial com Alocação de Capacitores	45
3.3	ESTRUTURA DE VIZINHANÇA: GERAÇÃO DE TOPOLOGIAS RADIAIS VIZINHAS	46
3.4	ALGORITMO DE BUSCA TABU PROPOSTO	49
4	ALGORITMO DE FLUXO DE CARGA RADIAL	52
4.1	FLUXO DE CARGA RADIAL DE TIPO VARREDURA	52
4.1.1	Cálculo da Corrente de Carga	53
4.1.2	Cálculo da Corrente no Ramo	54
4.1.3	Cálculo das Tensões nas Barras	55
4.1.4	Cálculo das Perdas no Sistema de Distribuição	55
4.2	IMPLEMENTAÇÃO DO FLUXO DE CARGA RADIAL DE VARREDURA EM LINGUAGEM FORTRAN	57

4.2.1	Banco de Dados	57
4.2.2	Módulo de Leitura de Dados	58
4.2.3	Módulo de Renumeração	58
5	TESTES COM OS ALGORITMOS PROPOSTOS	62
5.1	SISTEMA DE 33 BARRAS	63
5.2	SISTEMA DE 70 BARRAS	65
5.3	SISTEMA DE 84 BARRAS	69
5.4	SISTEMA DE 136 BARRAS	73
6	CONCLUSÕES	77
	REFERÊNCIAS	79
	ANEXO A - FLUXO DE CARGA PARA SISTEMAS FRACAMENTE MA- LHADOS	83
A.1	CÁLCULO DAS CORRENTES NOS <i>BREAKPOINTS</i> - MÉTODO DE COM- PENSAÇÃO	84
A.2	CÁLCULO DA MATRIZ DE IMPEDÂNCIAS EQUIVALENTES VISTAS PE- LOS <i>BREAKPOINTS</i>	85
A.3	PROCESSO ITERATIVO DE COMPENSAÇÃO	86
	ANEXO B - DADOS DOS SISTEMAS TESTADOS	88
B.1	SISTEMA DE 33 BARRAS	88
B.2	SISTEMA DE 70 BARRAS	89
B.3	SISTEMA DE 84 BARRAS	91
B.4	SISTEMA DE 136 BARRAS	93

1 INTRODUÇÃO

Devido ao aumento da demanda de energia elétrica e a necessidade de poder atender os consumidores com qualidade é preciso desenvolver estratégias para que o sistema de distribuição de energia elétrica opere de modo econômico e confiável. Geralmente, na operação, os sistemas de distribuição são configurados sempre de forma radial, contudo esta configuração nem sempre garante alternativas de fornecimento de energia em situações que exigem alta demanda de energia elétrica podendo resultar em problemas operacionais no sistema. Entretanto, do ponto de vista construtivo, um sistema de distribuição é malhado.

O problema de operação dos sistemas de distribuição, tem um fator importante, que está relacionado com as perdas nos sistemas de distribuição. As perdas não proporcionam lucro para as empresas de serviço público e muitas vezes é um dos fatores de controle ao avaliar as estratégias de planejamento e da operação do sistema.

Alterar a topologia da rede de distribuição de modo a manter sempre a sua radialidade, abrindo e fechando chaves seccionadoras em pontos considerados estratégicos, ou seja, reconfigurar o sistema pode resultar na redução das perdas de potência ativa e nos períodos de desligamentos. Assim como a utilização de banco de capacitores é uma das formas de reduzir as perdas de energia, aumentar os níveis de tensão na rede e corrigir o fator de potência, entre outras vantagens.

Neste trabalho é apresentado um algoritmo reformulado baseado na meta-heurística Busca Tabu (TS, do inglês *Tabu Search*) para a solução do problema da reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica (RSDEE) e a alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica com o objetivo de obter a configuração radial do sistema de distribuição que apresente o menor custo de operação.

1.1 O PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

O problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica tem como objetivo encontrar uma configuração radial que possa minimizar as perdas de um sistema através da abertura e fechamento de chaves de interconexões.

No problema, dada uma topologia malhada, procura-se a topologia radial que produza perdas mínimas (a configuração dos sistemas de distribuição possuem uma estrutura malhada, mas apesar disso eles operam de forma radial). Em outras palavras dado um grafo, pretende-se encontrar uma árvore geradora que minimize as perdas do sistema de distribuição satisfazendo 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 configuração deve ser radial.

Na Teoria dos grafos os algoritmos de Prim e Kruskal garantem encontrar uma árvore geradora mínima utilizando os pesos das arestas de um grafo (HARRIS; HIRST; MOSSINGHOFF, 2008). No problema de RSDEE foi utilizado o algoritmo de Prim para encontrar uma árvore geradora máxima que produz perdas mínimas, onde as arestas foram chamadas de ramos e o fluxo de potência ativa nos ramos foram usados como pesos.

A reconfiguração de sistemas de distribuição é um problema de origem combinatória, que pode ser formulado como um modelo de programação não linear inteiro misto (PNLIM), pois uma grande quantidade de topologias radiais podem ser configuradas resultando em uma grande explosão combinatória.

Para resolver este problema são utilizados métodos de solução como os de otimização clássica e algoritmos heurísticos, que podem fornecer soluções para o problema mas não garantem soluções ótimas, como os algoritmos apresentados em Civanlar *et al.* (1988), Baran e Wu (1989a) e Shirmohammadi e Hong (1989). Também podem ser utilizados métodos baseados no comportamento de fenômenos naturais como as meta-heurísticas (Algoritmo Genético, *Tabu Search*, *Grasp*, *Simulated Annealing*, entre outros) que são métodos muito eficientes para resolver problemas de origem combinatória. Estes algoritmos são bastante utilizados em pesquisas na área de sistemas elétricos de potência.

1.1.1 Modelo Matemático do Problema da Reconfiguração de Sistemas de Distribuição

Adaptado de Franco *et al.* (2012), o modelo matemático do problema de RSDEE que minimiza os custos das perdas em sistemas radiais considerando três níveis de demanda é mostrado em (1)-(7):

$$\min v = \sum_{d \in \Omega_d} \sum_{ij \in \Omega_l} c_d^{ls} \Delta_d [G_{ij} x_{ij} (V_{i,d}^2 + V_{j,d}^2 - 2V_{i,d}V_{j,d} \cos \theta_{ij,d})] \quad (1)$$

Sujeito a:

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

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

$$\underline{V} \leq V_{i,d} \leq \bar{V} \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (4)$$

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

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

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

No modelo (1)-(7) a função objetivo mostrada em (1) minimiza os custos totais de perdas de potência ativa do sistema, onde:

G_{ij} é a condutância do ramo ij ;

x_{ij} define o estado de operação da chave do ramo ij (aberto ou fechado);

$V_{i,d}$ é o módulo de tensão na barra i no nível de demanda d ;

$V_{j,d}$ é o módulo de tensão na barra j no nível de demanda d ;

$\theta_{ij,d}$ é a diferença angular entre as tensões das barras i e j no nível de demanda d ;

c_d^{ls} é o custo das perdas no nível de demanda d ;

Δ_d é o período de duração do nível de demanda d ;

Ω_l é o conjunto de ramos do sistema de distribuição;

Ω_d é o conjunto dos níveis de demanda;

$P_{i,d}^S$ e $Q_{i,d}^S$ representam potências ativas e reativas fornecidas pela subestação na barra i , no nível de demanda d ;

$P_{i,d}^D$ e $Q_{i,d}^D$ representam demandas ativas e reativas na barra i , no nível de demanda d ;

$P_{ij,d}$ e $Q_{ij,d}$ são os fluxos de potência ativa e reativa no ramo ij , no nível de demanda d ;

$\underline{V}$ e $\bar{V}$ são os limites dos módulos de tensão inferior e superior nas barras;

$\bar{I}_{ij}$ é o fluxo máximo de corrente permitido no ramo ij ;

$I_{r_{ij,d}}$ e $I_{m_{ij,d}}$ representam as componentes real e imaginária da corrente no ramo ij no nível de demanda d ;

Ω_{b_i} é o conjunto de barras conectadas à barra i ;

Ω_b é o conjunto de barras do sistema de distribuição.

A restrição (2) corresponde ao balanço de potência ativa, a restrição (3) corresponde ao balanço de potência reativa nos quais $P_{ij,d}$ e $Q_{ij,d}$ são obtidas pelas leis de Kirchhoff, em que são calculadas em (8) e (9), $\forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d$:

$$P_{ij,d} = V_{i,d}^2 G_{ij} - V_{i,d} V_{j,d} (G_{ij} \cos \theta_{ij,d} + B_{ij} \sin \theta_{ij,d}) \quad (8)$$

$$Q_{ij,d} = -V_{i,d}^2 B_{ij} - V_{i,d} V_{j,d} (G_{ij} \sin \theta_{ij,d} - B_{ij} \cos \theta_{ij,d}) \quad (9)$$

A restrição (4) representa os limites de módulo de tensão em cada barra do sistema, a restrição (5) representa o fluxo máximo de corrente permitido no ramo ij , em que $I_{r_{ij,d}}$ e $I_{m_{ij,d}}$ são calculadas em (10) e (11), $\forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d$:

$$I_{r_{ij,d}} = G_{ij} (V_{i,d} \cos \theta_{i,d} - V_{j,d} \cos \theta_{j,d}) - B_{ij} (V_{i,d} \sin \theta_{i,d} - V_{j,d} \sin \theta_{j,d}) \quad (10)$$

$$I_{m_{ij,d}} = G_{ij} (V_{i,d} \sin \theta_{i,d} - V_{j,d} \sin \theta_{j,d}) + B_{ij} (V_{i,d} \cos \theta_{i,d} - V_{j,d} \cos \theta_{j,d}) \quad (11)$$

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

A restrição (6) é uma condição necessária para a radialidade do sistema e a (7) indica a natureza binária da variável de decisão x_{ij} , em que $x_{ij} = 0$ quando o ramo está desligado e $x_{ij} = 1$ quando o ramo está ligado.

Lavorato *et al.* (2012), assegura que as restrições (2) e (3), em conjunto com (6), garantem que uma solução factível do problema, seja radial.

1.1.2 Cálculo da Função Objetivo

O cálculo da Função Objetivo mostrada na equação (12), 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 mostra o custo das perdas no sistema, e é utilizada para avaliar a qualidade da solução nos problemas de RSDEE.

$$f = k_e \sum_{i=1}^{nc} T_i P_i \quad (12)$$

em que

f é a função objetivo;

k_e é o custo da energia (em \$/kWh);

nc são os níveis de carregamento;

T_i é o tempo de operação do sistema no carregamento i ;

P_i são as perdas de potência ativa no carregamento i .

1.2 O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

O problema de alocação de capacitores em sistemas de distribuição é definido como um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM) de difícil solução, que apresenta alguns fatores que o tornam complexo como a existência de um número elevado de soluções factíveis, que dificulta a obtenção da solução mínima global e também elevado tempo computacional para obter uma solução.

Bancos de capacitores são fontes de potência reativa capacitiva. Em sistemas elétricos de potência os bancos de capacitores são usados para corrigir o fator de potência, diminuir as perdas de potência ativa nas linhas, melhorar o perfil de tensão nas barras, compensar a potência reativa, e aumentar a capacidade de transmissão do sistema. A eficiência da alocação de capacitores em sistemas de distribuição depende da escolha do local, tamanho, tipo e número de bancos de capacitores (LEVITIN *et al.*, 2000).

Existem dois tipos de bancos de capacitores: os fixos e os chaveados. Os capacitores fixos, apresentam menor custo e ficam constantemente ligados, já os chaveados são ligados de acordo com o nível de carregamento da rede, o que torna possível algum ajuste na tensão, para quando a carga apresentar variações, a tensão seja mantida dentro de determinados limites.

Os bancos de capacitores chaveados podem ser automáticos, podendo realizar uma compensação automática por meio de sinais de tensão e corrente ligando e desligando o módulo dos capacitores de acordo com a necessidade (MONTICELLI, 1983).

1.2.1 Modelo Matemático do Problema de Alocação de Capacitores em Sistemas de Distribuição

O modelo matemático não linear inteiro misto para o problema de alocação ótima de bancos de capacitores em sistemas de distribuição, que considera a alocação de capacitores fixos e chaveados em níveis de demanda variáveis assume a seguinte forma (RIBEIRO, 2013):

$$\min v = k_c \sum_{i \in \Omega_b} (c^{fx} q_i + c^{sw} q_i^{sw} + c^{un} n_i^{cp}) + t_l \sum_{d \in \Omega_d} c_d^{ls} D_d \sum_{ij \in \Omega_l} (R_{ij} I_{ij,d}^2) \quad (13)$$

Sujeito a

$$\sum_{ji \in \Omega_l} P_{ji,d} - \sum_{ij \in \Omega_l} (P_{ij,d} + R_{ij} I_{ij,d}^2) + P_{i,d}^S = P_{i,d}^D \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (14)$$

$$\sum_{ji \in \Omega_l} Q_{ji,d} - \sum_{ij \in \Omega_l} (Q_{ij,d} + X_{ij} I_{ij,d}^2) + Q_{i,d}^S + Q^{cp} n_{i,d} = Q_{i,d}^D \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (15)$$

$$V_{i,d}^2 - 2(R_{ij} P_{ij,d} + X_{ij} Q_{ij,d}) - z_{ij}^2 I_{ij,d}^2 - V_{j,d}^2 = 0 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (16)$$

$$V_{j,d}^2 I_{ij,d}^2 = P_{ij,d}^2 + Q_{ij,d}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (17)$$

$$\underline{V}^2 \leq V_{i,d}^2 \leq \bar{V}^2 \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (18)$$

$$0 \leq I_{ij,d}^2 \leq \bar{I}_{ij}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (19)$$

$$0 \leq n_i^{cp} \leq \bar{n}_b^{cp} q_i \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (20)$$

$$n_{i,d} \leq n_i^{cp} \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (21)$$

$$-\bar{n}_b^{cp} q_i^{sw} \leq n_{i,d} - n_{i,d-1} \leq \bar{n}_b^{cp} q_i^{sw} \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \mid d > 1 \quad (22)$$

$$\sum_{i \in \Omega_b} q_i \leq \bar{n}^{cp} \quad (23)$$

$$n_{i,d} \text{ inteiro} \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (24)$$

$$q_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (25)$$

$$q_i^{sw} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (26)$$

em que

k_c é o fator de recuperação de capital do banco de capacitor;

c^{fx} é o custo de instalação dos bancos de capacitores fixos ou chaveados (\$);

q_i é a variável binária para alocação de um banco de capacitor fixo ou automático no nó i ;

c^{sw} é o custo do equipamento dos bancos de capacitores chaveados (\$);

q_i^{sw} representa a variável binária para alocação de um equipamento chaveado para módulos de capacitores no nó i ;

c^{un} é o custo unitário de cada módulo de capacitor (\$);

n_i^{cp} representa o número de módulo de capacitores instalados no nó i ;

t_l é a taxa de recuperação dos custos das perdas de potência ativa;

c_d^{ls} representa o custo da energia nos níveis de demanda d (\$/kWh);

D_d representa o número de horas em um ano do nível de demanda $d(h)$;

R_{ij} é a resistência do ramo ij ;

$I_{ij,d}^2$ é a variável que representa o quadrado de $I_{ij,d}$, no nível de demanda d ;

$P_{ij,d}$ representa o fluxo de potência ativa no circuito ij no nível de demanda d ;

$P_{i,d}^S$ é o fluxo de potência ativa fornecido pela subestação no circuito ij no nível de demanda d ;

$P_{i,d}^D$ é a demanda de potência ativa no nó i no nível de demanda d ;

$Q_{ij,d}$ é o fluxo de potência reativa no circuito ij no nível de demanda d ;

$Q_{i,d}^S$ representa o fluxo de potência reativa fornecido pela subestação no circuito ij no nível de demanda d ;

Q^{CP} é a potência reativa de cada módulo de capacitor (kVAr);

$n_{i,d}$ representa o número de módulos de capacitores operantes no nó i no nível de demanda d ;

$Q_{i,d}^D$ representa a demanda de potência reativa no nó i no nível de demanda d ;

$V_{i,d}^2$ é a variável que representa o quadrado de $V_{i,d}$, no nível de demanda d ;

X_{ij} é a reatância do circuito ij ;

Z_{ij} é a impedância do circuito ij ;

$\underline{V}$ é a magnitude da tensão mínima (kV);

$\bar{V}$ é a magnitude da tensão máxima (kV);

$\bar{I}_{ij}$ é o limite máximo da magnitude de corrente no circuito ij ;

$\bar{n}_b^{CP}$ representa o número máximo de módulos de capacitores que podem ser instalados no nó do sistema;

$\bar{n}^{CP}$ representa o número máximo de bancos de capacitores fixos ou chaveados que podem ser adicionados no sistema;

Ω_b é o conjunto de nós;

Ω_l é o conjunto de circuitos;

Ω_d é o conjunto dos níveis de demanda.

O estado de operação em regime permanente de um sistema de energia elétrica radial são representados pelas restrições (14)-(17), e nessas restrições considera-se a presença de bancos de capacitores e diferentes níveis de demanda.

A função objetivo (13) minimiza o custo total, em que o custo de investimento é representado na primeira parte, o qual é dividido em custos de instalação de bancos de capacitores fixos ou chaveados, custos do equipamento para o chaveamento dos bancos de capacitores e o custo total dos módulos de capacitores instalados. O custo anual das perdas de energia é representado na segunda parte.

O balanço de potência ativa (primeira lei de Kirchhoff) é representada pela restrição (14), em cada nó i , no nível de demanda d . O fluxo total de potência que chega no nó ($\sum_{j \in \Omega_l} P_{ji,d}$) mais a injeção de potência ativa no nó que passa pela subestação ($P_{i,d}^S$) menos a soma do fluxo total de potência ativa que deixa o nó mais as perdas no circuito ($\sum_{j \in \Omega_l} (P_{ij,d} + R_{ij} I_{ij,d}^2)$) tem que ser igual a demanda de potência ativa no nó ($P_{i,d}^D$).

O balanço de potência reativa (primeira lei de Kirchhoff) é representada pela restrição (15) considerando a presença de bancos de capacitores, em cada nó i , no nível de demanda d . O fluxo total de potência reativa que chega no nó ($\sum_{j \in \Omega_l} Q_{ji,d}$) mais a injeção de potência reativa no nó que passa pela subestação ($Q_{i,d}^S$), somando a injeção de potência reativa no nó fornecida pelos bancos de capacitores operantes ($Q^{CP} n_{i,d}$), menos a soma do fluxo total de potência reativa que deixa o nó mais as perdas no circuito ($\sum_{j \in \Omega_l} (Q_{ij,d} + X_{ij} I_{ij,d}^2)$) tem que ser igual a demanda de potência reativa no nó ($Q_{i,d}^D$).

A queda de tensão é representada pela restrição (16), onde a magnitude de tensão no nó terminal ($V_{j,d}^2$) é calculada pelo valor da magnitude de tensão do nó inicial ($V_{i,d}^2$), menos o valor de demanda em um ponto de operação do sistema ($2(R_{ij} P_{ij,d} + X_{ij} Q_{ij,d})$) menos as perdas de potência ativa e reativa no ramo ij ($z_{ij}^2 I_{ij,d}^2$).

A restrição (17) representa a magnitude do fluxo da corrente, é uma equação não linear devido a inequação que relaciona o produto da magnitude de tensão ($V_{j,d}^2$) pela corrente ($I_{ij,d}^2$), e também ao quadrado dos fluxos de potência ativa e reativa ($P_{ij,d}^2 + Q_{ij,d}^2$).

Na verdade a aplicação da segunda Lei de Kirchhoff gera uma restrição do tipo (16) e do tipo (17) para cada laço fundamental formado pelo ramo entre as barras i e j e as demandas conectadas à terra através das barras i e j .

Para cada nó i , no nível de demanda d , a restrição (18) representa a magnitude de tensão ao quadrado do nó i , em que o quadrado da magnitude de tensão ($V_{i,d}^2$) está entre o valor mínimo ($\underline{V}^2$) e o máximo ($\bar{V}^2$).

A restrição (19) estabelece o atendimento dos limites do fluxo de corrente no circuito ij , no nível de demanda d , ($I_{ij,d}^2$), limitado inferiormente pelo zero e superiormente pelo valor máximo da corrente ao quadrado ($\bar{I}_{ij}^2$).

A quantidade limite de módulos de capacitores instalados (n_i^{CP}) no nó i , limitado inferiormente por zero e superiormente pelo produto do número máximo de módulos de capacitores

que podem ser instalados no nó do sistema ($\bar{n}_b^{cp}$), com a variável binária que indica a alocação ou não dos bancos de capacitores (q_i) é representado pela restrição (20).

A restrição (21) mostra que o número de bancos de capacitores operantes no nó i no nível de demanda d ($n_{i,d}$) deve menor ou igual ao número de módulos de capacitores instalados no nó i (n_i^{cp}).

Na restrição (22), no nó i a variável (q_i^{sw}) de natureza binária decide se aloca ou não o equipamento de chaveamento nos bancos de capacitores, ou seja, em cada nível de demanda a quantidade dos módulos de capacitores ligados pode ser diferentes, já a quantidade dos módulos de capacitores fixos é igual para todos os níveis de demanda.

O número máximo de bancos de capacitores que podem ser instalados no sistema é representado pela restrição (23), sendo que a somatória da variável binária, que decide se aloca ou não os bancos de capacitores ($\sum_{i \in \Omega_b} q_i$), deve ser menor ou igual ao número máximo de bancos de capacitores que podem ser adicionados no sistema ($\bar{n}^{cp}$).

Na restrição (24) o número de módulos de capacitores operantes no nó i , no nível de demanda d são representados pela variável inteira ($n_{i,d}$).

A variável binária (q_i) na restrição (25) decide se é alocado ou não bancos de capacitores fixos ou chaveados no nó i .

A restrição (26) é uma variável binária (q_i^{sw}), que decide pela alocação ou não do equipamento de chaveamento nos bancos de capacitores no nó i .

1.2.2 Cálculo da Função Objetivo

Quando é considerada apenas a alocação de bancos de capacitores, a função objetivo mostrada na equação (27) avalia o custo de investimento e operação dos bancos de capacitores, pois nestes custos estão incluídos: o de instalação de capacitores em cada barra, o custo pela compra de bancos fixos e chaveados e o custo das perdas de potência ativa no período de operação.

$$f_c = K_c n_{bc} + \sum_{j=1}^{n_{cf}} C_{fj} + \sum_{j=1}^{n_{ca}} C_{aj} + K_e \sum_{i=1}^{nc} T_i P_i \quad (27)$$

em que:

f_c é a 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 bancos de capacitores.

n_{cf} quantidade de banco de capacitor fixo instalado.

C_{fj} custo de um banco de capacitor fixo.

n_{ca} quantidade de banco de capacitor chaveado instalado.

C_{aj} custo de um banco de capacitor chaveado.

K_e é o custo da energia (em US\$ / kWh)

nc níveis de carregamento

T_i tempo de operação do sistema no carregamento i .

P_i perdas de potência ativa no carregamento i .

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE MODELOS MATEMÁTICOS E TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO USADAS NA RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Na literatura especializada o problema de RSDEE é estudado com o uso de heurísticas, meta-heurísticas e técnicas exatas de otimização. Estão apresentadas a seguir as principais contribuições encontradas na literatura para resolver esse tipo de problema.

1.3.1 Heurísticas Aplicadas ao Problema de RSDEE

Merlin e Back (1975) foram os primeiros a introduzir o conceito de reconfiguração de redes de distribuição usando duas metodologias: uma heurística construtiva e um algoritmo de otimização clássica, de modo a obter uma configuração que possa minimizar as perdas. A heurística inicia partindo da configuração com todas as chaves fechadas, em cada passo, calcula-se um Fluxo de Carga e abre-se a chave cujo ramo tem o menor fluxo de potência aparente e que mantém a rede conexa. O processo é repetido até que uma configuração radial seja obtida. Os autores afirmam que a escolha de abrir a chave do ramo com o menor fluxo de corrente perturba o mínimo possível as distribuições dos fluxos nos ramos do sistema e, assim, certo grau das perdas reduzidas de uma rede malhada pode ser mantido.

Civanlar *et al.* (1988) usaram um método heurístico, que a partir de uma configuração radial, é feita uma troca de ramos para reduzir as perdas na rede de distribuição com base na estimativa de mudança nas perdas durante a transferência de um grupo de cargas de um alimentador para outro. A variação das perdas é calculada utilizando uma expressão matemática que fornece a melhor chave que deve ser fechada ou aberta na rede.

Considerando a redução de perdas Shirmohammadi e Hong (1989) modificaram o método proposto por Merlin e Back (1975) incluindo as restrições de limites de tensão e corrente. Foi

proposto um algoritmo heurístico construtivo (AHC) que a partir de uma rede malhada, em cada etapa é calculado um fluxo de carga para sistemas fracamente malhados e a chave a ser aberta será aquela que está no ramo cujo fluxo de corrente é o menor e mantém a rede conexa.

A metodologia apresentada por Baran e Wu (1989a) é baseada no método de Civanlar *et al.* (1988). Nesta metodologia é considerada a redução das perdas e o balanceamento das cargas. A proposta foi aprimorar a troca de ramos apresentando dois métodos aproximados para calcular o fluxo de carga, e assim acelerar a busca da solução ótima com diferentes graus de precisão.

Para contornar o problema do método proposto por Shirmohammadi e Hong (1989) de que o padrão de fluxo ótimo é determinado para uma rede malhada, Goswami e Basu (1992) propuseram uma heurística para a RSDEE que tem por objetivo a minimização das perdas do sistema, onde é considerada a possibilidade de formar um laço por vez no sistema. Portanto, o algoritmo fecha apenas uma chave de cada vez, adicionando uma malha no sistema, que volta para a configuração radial abrindo a mesma ou outra chave no laço. Repete-se o procedimento até percorrer todos os laços do sistema. Os resultados obtidos foram melhores que os resultados de Shirmohammadi e Hong (1989).

Gomes *et al.* (2005) desenvolveram uma heurística composta por duas etapas. Na primeira etapa, parte-se de uma configuração malhada, e as chaves de interconexões são abertas em cada passo até obter uma configuração radial. A segunda etapa se baseia em reduzir as perdas do sistema através da troca de ramos, para tentar diminuir as perdas obtidas na fase construtiva.

1.3.2 Meta-heurísticas Aplicadas ao Problema de RSDEE

Chiang e Jean-Jumeau (1990) propuseram uma formulação multi-objetivo para o problema de RSDEE considerando o problema de redução de perdas e o balanceamento de cargas, onde o número de operações de chaveamento é colocado como restrição do problema de RSDEE para reduzir as perdas e balancear as cargas. A solução é obtida utilizando-se a meta-heurística *simulated annealing* e o método da restrição ϵ para otimização multi-objetivo.

O primeiro método baseado no algoritmo genético para resolver o problema de RSDEE e minimizar as perdas foi proposto por Nara *et al.* (1992). A codificação é feita através de uma representação binária a qual permite o aparecimento de configurações não radiais (com malhas e com barras ilhadas).

Mendoza *et al.* (2006) propuseram uma metodologia para melhora dos algoritmos genéticos aplicados ao problema de RSDEE. A proposta é considerar uma população inicial factível e também operadores genéticos de recombinação e mutação especializados, de modo que todos os indivíduos gerados pelo AG são factíveis com relação à topologia radial do sistema e às restrições de operação

Guimarães *et al.* (2005) desenvolveu um algoritmo de reconfiguração baseado em Busca Tabu com o objetivo de aumentar a margem de segurança da rede com relação à estabilidade de tensão. O algoritmo é iniciado partindo de uma configuração factível gerada por Shirmohammadi e Hong (1989). Foi observado que quando era utilizada uma solução inicial gerada por um algoritmo heurístico, as configurações encontradas eram melhores.

Zhang, Fu e Zhang (2007) propõem um algoritmo *Tabu Search* melhorado, utilizando um operador de mutação do Algoritmo Genético para a minimizar as perdas. A metodologia adotada utiliza uma equação de variação das perdas parecida à apresentada em Baran e Wu (1989) para reduzir o espaço de busca.

Carreño, Romero e Padilha-Feltrin (2008) propuseram uma modificação do algoritmo genético de Chu-Beasley. O algoritmo utiliza um operador de recombinação que garante gerar apenas soluções factíveis, reduzindo o espaço de busca e o tempo computacional.

Franco *et al.* (2012) apresentam um algoritmo de TS para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição para minimizar de perdas. A solução inicial é gerada utilizando o algoritmo de Prim (onde o custo de cada ramo é aleatório). Após isso, a função objetivo das soluções vizinhas é estimada pela fórmula aproximada de Baran e Wu (1989a). O ótimo desempenho computacional obtido se deve à maneira de como foi avaliada a função objetivo e a técnica de redução de vizinhos.

Uma meta-heurística GRASP é utilizada em Souza (2013) para resolver o problema de RSDEE. O objetivo é minimizar de perdas ativas do sistema. Na metodologia proposta, todas as chaves de interconexões do sistema de distribuição estão inicialmente abertas, a cada passo uma chave é fechada de acordo com um índice de sensibilidade obtido através da solução de um problema de programação não linear e uma solução factível é construída.

Um Algoritmo Genético com mutação guiada foi apresentado por Eldurssi e O'Connell (2015) para resolução do problema de RSDEE multi-objetivo com o objetivo de minimizar perdas e a quantidade de chaveamentos e assim melhorar os níveis de tensão.

1.3.3 Técnicas de Otimização Clássicas Aplicadas ao Problema de RSDEE

Merlin e Back (1975) desenvolveram uma metodologia para a resolução do problema de RSDEE que utiliza a técnica de *Branch and Bound*, obtendo uma configuração de boa qualidade. Como limitante inferior são utilizadas as perdas correspondentes à configuração totalmente malhada e como limitante superior são utilizadas as perdas correspondentes da configuração radial obtida com uma heurística, já analisada anteriormente.

Em Glamocanin (1990) foi utilizado o método Simplex para resolver o problema de RSDEE como um problema de transporte com custos quadráticos. O método parte de uma configuração

inicial obtida com a linearização das perdas, e a partir da configuração obtida o método simplex é utilizado para melhorá-la.

Momoh e Caven (2003) propuseram uma aplicação da técnica *Branch and Bound* no problema de reconfiguração multi-objetivo de sistemas de energia. Foi utilizada programação linear em conjunto ao método de pontos interiores, com o objetivo de aumentar a confiabilidade (analisando as contingências), equilibrar as cargas entre alimentadores com carregamentos ruins e minimizar a quantidade de operações de chaveamento.

Dois modelos pra resolver o problema de reconfiguração foram propostos por Jabr, Singh e Pal (2012). O primeiro é um Modelo Convexo de Segunda Ordem Inteiro Misto (PCSOIM) e o segundo é um modelo de Programação Linear Inteiro Misto (PLIM). Na comparação dos dois modelos foi verificado que o PCSOIM é mais rápido para encontrar uma solução factível e mais adequado para aplicações em tempo real, mas para sistemas de grande porte o PLIM encontra soluções melhores.

Borges, Franco e Rider (2014) desenvolveram um modelo de programação linear inteiro misto para resolver o problema de RSDEE e minimizar as perdas do sistema. O modelo foi testado em sistemas de grande porte, e as soluções encontradas foram iguais ou melhores que as encontradas na literatura.

1.4 O PROBLEMA INTEGRADO DE RECONFIGURAÇÃO E ALOCAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

A reconfiguração e a alocação de capacitores em sistemas de distribuição são dois dos principais meios para reduzir as perdas técnicas no sistema de distribuição de energia elétrica.

A reconfiguração em sistemas de distribuição de energia elétrica é feita para reduzir as perdas no sistema de distribuição, equilibrando as cargas entre diferentes alimentadores e melhorando a qualidade da fonte de alimentação mudando os estados (aberto/fechado) de algumas chaves de seccionamento. Porém, para algumas cargas reativas elevadas no sistema, a reconfiguração da rede não reduz efetivamente as perdas de energia causadas por fluxos de potência reativa (ZHANG *et al.*, 2006).

Um banco de capacitores pode fornecer a potência reativa necessária para compensar uma carga indutiva instalada em uma barra do sistema. Os bancos de capacitores são estrategicamente instalados nas barras do sistema de distribuição e podem diminuir o módulo da corrente nos ramos do sistema de distribuição (e também nas linhas de transmissão), reduzindo as perdas de potência ativa e, adicionalmente, podem melhorar o perfil de tensão do sistema de distribuição. Assim, as condições de operação são melhoradas e as perdas são minimizadas. Porém, somente a alocação de banco de capacitores pode não reduzir as perdas causadas devido à sobrecarga de alguns alimentadores (ZHANG *et al.*, 2006).

Logo, se combinarmos essas duas alternativas e suas diferentes propriedades podemos alcançar uma diminuição de perdas significativa no sistema de distribuição. Na literatura podemos encontrar poucos trabalhos que usam de forma integrada o problema de reconfiguração e a alocação de bancos de capacitores que visam a redução de perdas.

Os primeiros a trabalhar com RSDEE e alocação de bancos de capacitores foram Lee e Brooks (1988), onde apresentaram um algoritmo sequencial do tipo força bruta utilizando o método de reconfiguração seguida de chaveamento de capacitores visando redução de perdas, em que se verificou ser vantajoso alterar a topologia da rede quando ocorrem variações significativas.

Peponis, Papadopoulos e Hatziargyriou (1996), propuseram um algoritmo de otimização que combina reconfiguração e alocação de capacitores através de um método iterativo. A reconfiguração é realizada pelo método de troca de ligações, já o problema de alocação de capacitores é resolvido por programação dinâmica (DURA, 1968; PAPADOPOULOS *et al.*, 1983). O objetivo é minimizar as perdas de energia do sistema considerando-se aspectos ligados à proteção, confiabilidade e qualidade de tensão.

Para reduzir as perdas de potência ativa e aumentar as margens de tensão em sistemas de energia elétrica Jiang e Baldick (1996) utilizaram *Simulated Annealing* para reconfiguração e controle de capacitores automáticos. Este trabalho utiliza um algoritmo de otimização em duas etapas. Na primeira etapa é realizado o controle dos capacitores de forma simultânea com a reconfiguração (*full search*). Na segunda etapa é realizada a reconfiguração e depois é encontrado o controle ótimo para os capacitores nesta configuração (*quick search*). Também realizou-se uma abordagem intermediária em que é feito o controle dos capacitores a cada iteração do algoritmo de reconfiguração (*feasible search*).

Zeng *et al.* (2002) desenvolveram um método iterativo para reduzir as perdas de potência ativa em redes de distribuição utilizando reconfiguração e alocação ótima de capacitores. O problema de alocação de bancos de capacitores é resolvido pelo Algoritmo Genético (AG) e a reconfiguração foi feita através de uma heurística denominada de “Mínima Tensão Nodal” que é baseada em um processo de busca para determinar áreas críticas do sistema.

Com o objetivo de reduzir as perdas do sistema Zhang, Fu e Zhang (2008) publicaram um algoritmo iterativo para otimização combinada de controle de capacitores e reconfiguração de redes de distribuição. Para ajustar os capacitores foi proposto um algoritmo genético aprimorado e para reconfiguração foi utilizado um algoritmo simplificado de troca de ramos partindo da solução gerada por cada iteração do algoritmo genético, associada ao ajuste ótimo dos capacitores.

Kalantar e Dashti (2006) propõem um método integrado para reconfiguração e alocação de capacitores baseado no Algoritmo Genético, com o objetivo de reduzir as perdas de potência ativa do sistema. A modelagem apresentada utiliza codificação binária, em que um cromossomo

é dividido em duas partes. A primeira parte representa a solução do problema de reconfiguração, composta de n^2 genes ou bits, onde n é o número de barras do sistema e a segunda parte representa a solução do problema de alocação de capacitores, composta de n bits. O algoritmo utiliza fluxo de potência para avaliar a qualidade das soluções encontradas.

Venkatesh e Ranjan (2006) utilizaram um algoritmo evolutivo para o problema de reconfiguração de redes de distribuição integrada com alocação ótima de bancos de capacitores. A modelagem da função objetivo do problema de otimização utiliza lógica *fuzzy*.

Em Chang (2008) também é proposto um método integrado para a solução combinada dos problemas de reconfiguração e alocação de capacitores em que é utilizada a meta-heurística colônia de formigas com o objetivo de reduzir das perdas de potência ativa no sistema. O cálculo das perdas é feito utilizando-se uma formulação simplificada dos fluxos nos alimentadores de distribuição.

Guimarães *et al.* (2009) aplicou o algoritmo genético para realizar a reconfiguração e a alocação de banco de capacitores. A otimização consiste na reconfiguração, a alocação de capacitores fixos e automáticos e o ajuste de tap dos transformadores em três níveis de carga (leve, normal e pesado). Também é proposto algoritmo baseado em *Simulated Annealing* para otimizar as posições de tap do transformador da subestação em conjunto com os taps dos capacitores automáticos previamente alocados nas barras pelos Algoritmos Genéticos. Consideram-se três níveis de carregamento no período de um ano de estudo.

Guimarães, Castro e Romero (2010) propuseram uma estratégia conjunta, da reconfiguração e a alocação de capacitores, aproveitando os recursos instalados na rede. Um algoritmo genético dedicado destinado a minimizar as perdas reais de energia do sistema, com *crossover* especial e mutação de operadores foi desenvolvido para tal fim. Os *status* dos interruptores de seccionamento e as informações dos capacitores fixos e automáticos são armazenados em um único cromossomo. Somente configurações radiais são geradas pelo Algoritmo Genético.

Montsutsumi (2017) propôs a realização da reconfiguração e alocação de bancos de capacitores com a utilização de uma meta-heurística baseada na metodologia multipartida considerando três níveis de carregamento no período de análise de um ano, com o objetivo de obter a configuração radial do sistema de distribuição que apresente o menor custo de operação.

2 A META-HEURÍSTICA BUSCA TABU REFORMULADA

Neste trabalho é utilizada uma meta-heurística Busca Tabu Reformulada, para resolver o problema integrado de RSDEE e alocação de bancos de capacitores operando em vários níveis de demanda, visando a operação ótima do sistema através da redução do custo das perdas de energia no sistema obtida pela reconfiguração e a alocação de bancos de capacitores. O algoritmo Busca Tabu foi escolhido por se tratar de uma meta-heurística que apresenta bons resultados em trabalhos da área de Pesquisa Operacional e na otimização de sistemas elétricos.

Neste capítulo é inicialmente apresentada uma introdução geral sobre meta-heurísticas, em seguida, a teoria básica sobre Busca Tabu e, por último é apresentada a Busca Tabu Reformulada.

2.1 TÓPICOS FUNDAMENTAIS NA ESTRUTURA DE UMA META-HEURÍSTICA

Uma meta-heurística se refere a uma estratégia mestre que guia e modifica outras heurísticas para produzir soluções além daquelas que são normalmente geradas em busca de otimização local (GLOVER; LAGUNA, 1997).

Meta-heurísticas bem elaboradas evitam ficar presas em ótimos locais ou sequências de soluções já visitadas (ciclagem) e fornecem uma garantia razoável de que a busca não negligenciou regiões promissoras (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003).

Cada meta-heurística tem seus próprios comportamentos e características. Em geral, um conjunto de características relacionadas com a aplicação da meta-heurística na resolução de um tipo de problema complexo devem ser especificados. Estas características são as seguintes: (1) Representação eficiente de uma proposta de solução, (2) Verificação da qualidade de uma proposta de solução, (3) Manipulação de infactibilidade de uma proposta de solução, (4) Geração de uma proposta inicial, (5) uma forma de caracterizar a vizinhança, e, (6) uma estratégia de escolha do vizinho mais adequado para realizar a transição, isto é, o vizinho que deve ser escolhido como solução corrente. A diferença fundamental entre as meta-heurísticas está na estratégia de escolha do vizinho (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003).

A escolha de uma forma de codificação ou representação de uma solução é a característica mais importante. A forma de como é representada uma proposta solução favorece encontrar o valor da função objetivo desta proposta, e assim é possível manipular as infactibilidades, além de poder permitir especificar a vizinhança mais adequada para realizar o processo de transição através do espaço de busca do problema.

A principal diferença entre as meta-heurísticas está na escolha do vizinho mais adequado para realizar a transição através do espaço de busca. Neste ponto, o assunto central é como contornar o principal problema da heurística de busca através de vizinhança tradicional, que é como sair de um ótimo local. O algoritmo TS por exemplo, sai de um ótimo local degradando a qualidade da solução corrente, isto é, se todos os vizinhos são de pior qualidade, então o algoritmo TS passa para o menos pior. Para evitar voltar a um ótimo local, o algoritmo TS usa uma lista de atributos proibidos. Em resumo, o algoritmo TS usa uma lista de atributos proibidos e um critério de aspiração para gerenciar as transições através do espaço de busca e sai dos ótimos locais degradando a solução corrente, isto é, realizando uma transição para uma solução de pior qualidade (POSSAGNOLO, 2015).

Nos últimos anos várias meta-heurísticas foram propostas, Glover e Kochenberger (2003) e Gendreau e Potvin (2010) apresentam análises mais detalhadas sobre as mais conhecidas.

2.2 FUNDAMENTOS DE BUSCA TABU

A Busca Tabu conhecida na literatura por *Tabu Search* (TS) foi originalmente proposta por Glover em 1986, para permitir que os métodos Busca Local superassem os ótimos locais. TS é uma extensão dos métodos clássicos de Busca Local, que se resume em buscar uma solução ou um sub-conjunto de soluções dentro de um conjunto de soluções. Uma das formas de implementar um algoritmo de busca local é a partir de uma solução corrente, percorrer a vizinhança dessa solução em busca de outra com valor menor (para um problema de minimização). Se tal solução vizinha for encontrada, torna-se a nova solução corrente e o algoritmo continua. Caso contrário, a solução corrente é um ótimo local em relação à vizinhança adotada.

TS é diferente de um algoritmo de busca local em dois aspectos fundamentais:

1. A partir da configuração corrente, passa-se à melhor configuração vizinha ou à menos pior, o que implica que é permitida uma degradação da qualidade da função objetivo.
2. O conjunto de vizinhos de uma configuração não se caracteriza de maneira estática. Assim, TS define uma nova estrutura de vizinhança, que varia dinamicamente em estrutura e dimensão durante todo o processo de otimização. Esta estratégia permite a TS realizar uma busca eficiente e inteligente. Os elementos da vizinhança são determinados de várias formas, como segue:
 - Usando uma lista tabu que armazena atributos de configurações consideradas tabu (proibidas). Esta estratégia evita ciclagem e retornar à configurações já visitadas.
 - Usando estratégias para diminuir a vizinhança ou a lista de configurações candidatas. TS apresenta pelo menos 4 métodos diferentes para encontrar uma vizinhança

de tamanho reduzido. Esta estratégia visa diminuir o esforço computacional necessário em cada transição.

- Usando configurações de elite e *path relinking* para caracterizar e encontrar novas configurações candidatas.
- Redefinir a estrutura de vizinhança durante o processo de otimização.

2.2.1 Algoritmo Busca Tabu com Memória de Curto Prazo

O TS básico pode ser visto simplesmente como a combinação de Busca Local com memórias de curto prazo. Os dois primeiros elementos básicos de qualquer heurística TS são a definição de seu espaço de busca e sua estrutura de vizinhança (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003). O algoritmo TS com memória de curto prazo é considerado o mais simples e usa uma lista de atributos proibidos e um critério de aspiração em sua formulação.

A memória de curto prazo faz com que as informações do passado recente do processo (*recência*) sejam armazenadas, isto é, devem ser armazenadas informações das últimas transições do algoritmo. A forma mais elementar de armazenar informação recente se baseia em armazenar a informação completa das configurações já visitadas. Esta proposta praticamente não é usada porque leva a problemas de memória para armazenamento e exige grande esforço computacional para analisar as informações já armazenadas. Portanto, a proposta mais viável consiste em armazenar os atributos das configurações visitadas. TS armazena atributos de configurações já visitadas no passado recente.

O armazenamento da informação através de atributos é vantajoso pois exige pequena memória para armazenamento e facilidade de manipulação e verificação. Entretanto, apresenta uma grande desvantagem de limitação em encontrar algumas configuração de excelente qualidade (inclusive a ótima global), pois essas configurações podem estar temporariamente proibidas por compartilharem atributos proibidos com configurações já visitadas. Este problema pode ser contornado de duas maneiras:

- Eliminando a proibição após k transições do algoritmo, que pode criar um novo problema, como o aparecimento de ciclagem, em que configurações já visitadas seriam visitadas novamente.
- Usando uma nova função ou estratégia TS chamada de critério de aspiração.

2.2.1.1 Critério de aspiração

A ideia central do critério de aspiração é eliminar a proibição do atributo de uma solução vizinha de excelente qualidade porque compartilha o mesmo atributo de uma solução já visitada.

Assim, se uma solução vizinha satisfaz um critério de qualidade que permite suspeitar que seja uma solução ainda não visitada, então eliminamos a proibição e realizamos a transição para essa solução vizinha.

O critério de aspiração mais simples e comumente usado (encontrado em quase todas as implementações do TS) consiste em aceitar uma solução vizinha, mesmo que seja tabu (proibido), se a solução possuir uma função objetivo melhor do que a solução incumbente, sendo que nesse caso existe certeza absoluta de que a nova solução ainda não foi visitada.

2.2.2 Algoritmo Busca Tabu com Memória de Longo Prazo

Em algumas aplicações, os componentes de memória TS de curta duração são suficientes para produzir soluções de alta qualidade. No entanto, em geral, TS se torna significativamente mais forte, incluindo a memória de longo prazo e suas estratégias (GLOVER; LAGUNA, 1997). Além da memória de curto prazo (estratégia de todo algoritmo TS básico) é incorporada uma estratégia adicional chamada de estratégia de longo prazo no algoritmo TS. Existem três aspectos fundamentais relacionados com a memória de longo prazo como a memória baseada em frequência, a estratégia de intensificação e diversificação.

2.2.2.1 Memória Baseada em Frequência

A memória baseada em frequência fornece um tipo de informação que complementa as informações fornecidas pela memória baseada em recência, ampliando a base para a seleção de movimentos preferenciais (GLOVER; LAGUNA, 1997).

A memória baseada em frequência tem como objetivo armazenar a informação do número de vezes em que um atributo foi escolhido para gerar ou participar da composição das configurações durante o processo TS. Existem dois tipos de memória baseadas em frequência:

1. As frequências de transição que armazenam a quantidade de vezes em que um atributo é retirado ou adicionado para formar novas configurações.
2. A frequência de residência ou permanência que armazena a informação do número de vezes em que um atributo permanece nas novas configurações ou em todas as configurações geradas durante o processo TS.

A informação baseada em frequência pode ser utilizada para penalizar ou incentivar configurações constituídas por determinados atributos.

2.2.2.2 Intensificação e Diversificação

Dois componentes altamente importantes da Busca Tabu são as estratégias de intensificação e diversificação.

A estratégia de intensificação consiste em realizar uma busca mais intensa em torno da solução corrente, por exemplo, aumentando o tamanho da vizinhança ou melhorando a qualidade da vizinhança. Intensificação pode ser implementada de várias formas diferentes tais como: Eliminando vizinhos ou incorporando novos vizinhos para a configuração corrente, modificando a caracterização de configuração vizinha ou retornando a regiões atrativas para realizar uma busca mais intensa.

A estratégia de diversificação significa sair de uma região do espaço de busca e, de forma proposital, chegar em uma região distante para novamente realizar algum processo de intensificação. Esta estratégia é implementada mudando a definição de vizinhança ou de configurações candidatas, incorporando “vizinhos” constituídos por atributos que foram pouco usados. Nesta parte podem ser usadas as estruturas de memória usadas em intensificação ou em memória de curto prazo, mas com critérios de duração modificados.

2.2.3 Estratégias adicionais utilizadas em Busca Tabu

2.2.3.1 Configurações de Elite em Busca Tabu

As configurações de elite são usadas de várias formas. Uma configuração de elite pode ser usada para reiniciar um processo de intensificação e também pode ser usada para gerar configurações atrativas através de *path relinking*. Esta estratégia permite apresentar no final do processo um conjunto de configurações de excelente qualidade além da incumbente. Para identificar e armazenar as configurações de elite, deve-se possuir uma estratégia adequada. Assim, por exemplo, uma configuração encontrada durante o processo TS é considerada de elite e substitui a pior configuração de elite já armazenada na lista de configurações de elite se possuir uma função objetivo de melhor qualidade que alguma das já armazenadas ou se possuir uma quantidade mínima de atributos diferentes com cada uma das configurações já armazenadas.

2.2.3.2 Oscilação Estratégica

A oscilação estratégica consiste em orientar os movimentos em relação a um nível crítico, identificado por um estágio de construção ou por um intervalo escolhido de valores funcionais.

Esta técnica geralmente é usada quando foi atingido um nível crítico em que o método TS normalmente pararia. Em vez de parar quando este limite é atingido, no entanto, as regras para selecionar movimentos são modificadas, para não passar na região limitada pelo nível

crítico. Após isso, muda-se novamente as regras de escolha de configurações candidatas tanto no afastamento como no retorno ao nível crítico, isto é, da fronteira do espaço de busca. Um processo repetitivo desta estratégia produz um movimento oscilatório em torno do nível crítico. O nível crítico pode ser determinado pela qualidade da configuração (função objetivo) ou pela fronteira de factibilidade e infactibilidade das configurações.

2.2.3.3 *Path Relinking*

Path Relinking é uma estratégia usada para gerar configurações atrativas para iniciar um processo de intensificação ou diversificação. Essa técnica gera novas soluções explorando trajetórias que conectam soluções de elite, ou seja, ela permite gerar novas configurações usando como base duas ou três configurações de qualidade.

Durante o processo Busca Tabu com memória de curto prazo são armazenadas as melhores configurações encontradas, chamadas de configurações de elite. Duas ou mais configurações de elite podem ser usadas para gerar uma configuração atrativa. A forma mais simples de implementar *path relinking* é copiando uma parcela dos atributos ou elementos de uma configuração de elite em outra configuração de elite.

2.2.4 A Formulação Básica de TS

A Busca Tabu surgiu como uma técnica de busca inteligente percorrendo o espaço de busca de forma eficiente e seletiva, usando estruturas de memória. Nesse processo é fundamental integrar no processo de busca as estratégias de intensificação e de diversificação.

A formulação básica de TS que está inspirada fundamentalmente no uso da estratégia de intensificação assume a seguinte forma:

1. Passo preliminar: Montar os dados do problema. Escolher uma forma de representação de uma proposta de solução denominada de p . Identificar uma forma de avaliar a qualidade da função objetivo ou equivalente e denominada $f(p)$. Definir a estrutura de vizinhança a ser usada o que caracteriza o espaço de busca. Identificar os atributos que devem ser proibidos e o critério de aspiração. Escolher os parâmetros do algoritmo tais como a duração da lista tabu. Escolher o critério de parada.
2. Encontrar uma solução inicial p_o que se transforma na solução corrente p_c .
3. Identificar e avaliar todas as soluções vizinhas da solução corrente p_c , ordenar essas soluções vizinhas por qualidade sendo que o primeiro da lista é a melhor solução vizinha p^{best} .

4. Realizar a transição para a solução vizinha melhor classificada que não tem o atributo proibido ou se tem o atributo proibido, então satisfaz o critério de aspiração. Seja p_e a melhor solução vizinha escolhida, então fazer $p_c = p_e$.
5. Atualizar a incumbente e a lista de atributos proibidos. Se o critério de parada for satisfeito então pare. Em caso contrário voltar ao passo 3.

O algoritmo TS anteriormente apresentado é chamado de algoritmo TS básico que fundamentalmente usa memória de curto prazo, uma lista de atributos proibidos e um critério de aspiração. Assim, é uma estratégia de otimização que prioriza a intensificação.

Técnicas de otimização tipo TS mais complexas podem ser implementadas onde o TS básico funciona como um módulo de otimização integrado em uma estrutura TS mais complexa. Essas estruturas mais complexas podem ser idealizadas usando outros operadores existentes em TS tais como a diversificação, a memória baseada em frequência, a lista de soluções de elite, o *path relinking*, entre outros.

2.3 A BUSCA TABU REFORMULADA

Baseado nos argumentos anteriormente apresentados, é proposto um algoritmo TS modificado que elimina o conceito de lista de atributos proibidos e o critério de aspiração. O algoritmo Busca Tabu Reformulado assume a seguinte forma:

1. Passo preliminar: Montar os dados do problema. Escolher uma forma de representação de uma proposta de solução denominada de p . Identificar uma forma de avaliar a qualidade da função objetivo ou equivalente e denominada $f(p)$. Definir a estrutura de vizinhança a ser usada o que caracteriza o espaço de busca. Escolher o parâmetro k_d que identifica o número de soluções geradas nas últimas k_d transições do algoritmo TS e que devem ser armazenadas para verificar se uma solução vizinha já foi visitada anteriormente. Escolher o parâmetro k_e que identifica o número de soluções de elite que o algoritmo TS deve armazenar. Escolher o critério de parada.
2. Encontrar uma solução inicial p_o que se transforma na solução corrente p_c .
3. Identificar e avaliar todas as soluções vizinhas da solução corrente p_c , ordenar essas soluções vizinhas por qualidade sendo que a primeira da lista é a melhor solução vizinha p^{best} .
4. Realizar a transição para a solução vizinha melhor classificada desde que essa solução vizinha não se encontra na lista das últimas k_d soluções vizinhas escolhidas no processo de transição e que se encontram armazenadas para verificação de ciclagem. Seja p_e a solução vizinha escolhida, então fazer $p_c = p_e$.

5. Atualizar a lista de soluções de elite e a lista das últimas k_d soluções geradas no processo de transição do algoritmo TS modificado, incorporando a solução vizinha p_e e retirando a proposta de solução mais antiga. Se o critério de parada for satisfeito então pare. Em caso contrário voltar ao passo 3.

Para que seja possível implementar o problema de otimização da operação com o novo algoritmo TS apenas devem ser especificados os seguintes aspectos:

1. Uma forma de representar uma proposta de solução.
2. Uma forma de gerar uma proposta de solução inicial de qualidade.
3. Uma forma de avaliar a qualidade de uma proposta de solução e uma forma de verificar se a proposta de solução é factível ou infactível.
4. Uma forma de vizinhança.

Finalmente, deve-se observar que no algoritmo TS reformulado não existe lista de atributos proibidos nem critério de aspiração. Assim, o conceito de atributo pode ser eliminado.

A vantagem da proposta apresentada é que não existe mais dúvidas se uma proposta de solução vizinha foi visitada anteriormente com uma margem de segurança muito grande e definida pelo valor de k_d .

As desvantagens são a necessidade de verificar se uma proposta de solução já foi visitada anteriormente e memória para armazenamento das soluções já visitadas. A seguir é mostrado experimentalmente que essas desvantagens não representam problemas no tema de pesquisa abordado.

3 PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO USANDO A BUSCA TABU

Nesse capítulo são descritos detalhadamente todos os passos necessários utilizados pelo Algoritmo Busca Tabu Reformulada para resolver o problema de operação ótima de um sistema de distribuição através de uma estratégia integrada de reconfiguração e alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição radiais.

3.1 REPRESENTAÇÃO DE UMA PROPOSTA DE SOLUÇÃO RADIAL

A forma de representar uma proposta de solução é relativamente simples. Inicialmente para o sistema teste base são resolvidos três problemas de fluxo de carga, um para cada nível de carregamento (leve, normal e pesado), que permite avaliar a qualidade da proposta de solução, assim como verificar se essa proposta é factível ou infactível. Para isso a representação da topologia da rede é feita através de um vetor, denominado *psi*, que contém a numeração dos ramos cujas chaves estão abertas ($x_{ij} = 0$) e quando estão fechadas ($x_{ij} = 1$). Na Tabela 1 é mostrada a representação da configuração radial inicial do sistema de 33 barras da Figura 1.

Tabela 1 - Representação da configuração radial inicial do sistema de 33 barras (Vetor *psi*)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37			
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0			

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

O vetor *psi* sempre será de comprimento *nl*, onde *nl* é o número de ramos do sistema. Adicionalmente, ($nl - nb + 1$) ramos, chamados de ramos de ligação, devem se encontrar abertos. Na Figura 1, é mostrado um sistema de $nl = 37$ ramos e $nb = 33$ barras. Assim, devem existir 32 ramos fechados e 5 ramos abertos (ramos de ligação). Podemos observar que as chaves 33, 34, 35, 36 e 37 estão inicialmente abertas.

- ii.* Entre todas as arestas que têm um vértice final marcado e um vértice final não marcado, escolha uma aresta de peso mínimo. Marque a aresta e marque também o vértice final não marcado.
- iii.* Se todos os vértices de G estiverem marcados, o conjunto de arestas marcadas formará uma árvore de peso mínimo. Caso contrário, volte ao passo *ii*.

No problema de RSDEE o algoritmo de Prim é utilizado para encontrar uma árvore geradora máxima que produz perdas mínimas, onde as arestas são chamadas de ramos e o fluxo de potência ativa nos ramos são os pesos. Para obtenção dos fluxos de potencia ativa nos ramos do sistema é resolvido um Fluxo de Carga para sistemas fracamente malhados (vide Anexo A), isto é, um problema de fluxo de carga com todos os ramos fechados.

A seguir é apresentada a heurística baseada no algoritmo de Prim para gerar uma solução inicial para o problema de RSDEE:

Dado: Um sistema inicialmente com todas as chaves fechadas. Calcule um FC para sistemas fracamente malhados (vide Anexo A) para o nível de demanda normal e adote como valor do peso dos ramos o fluxo de potência ativa de cada ramo. Abra todas as chaves do sistema.

- i.* Marque o nó da subestação;
- ii.* De todos os ramos que tenham um nó terminal marcado e outro não marcado, escolha aquele com o maior peso e feche a chave;
- iii.* Marque o nó terminal não marcado do ramo escolhido.
- iv.* Se todos os nós estiverem marcados, o conjunto de ramos marcados formará uma árvore de peso máximo e, portanto pare o processo porque foi encontrada uma topologia radial. Caso contrário, volte ao passo *ii*.

Após gerar a topologia radial usando o algoritmo de Prim, resolver três problemas de fluxo de carga radial (um problema de fluxo de carga para cada nível de carregamento) para calcular a função objetivo da proposta de solução encontrada pelo algoritmo de Prim.

Levando-se em conta o sistema de 33 barras da Figura 1, apresenta-se em seguida um exemplo ilustrativo, considerando a heurística baseada no algoritmo de Prim mostrada anteriormente, para obter uma solução inicial de boa qualidade para o problema. Na Tabela 2 apresentam-se os ramos ordenados, do maior para o menor Índice de fluxo de potência ativa de um ramo.

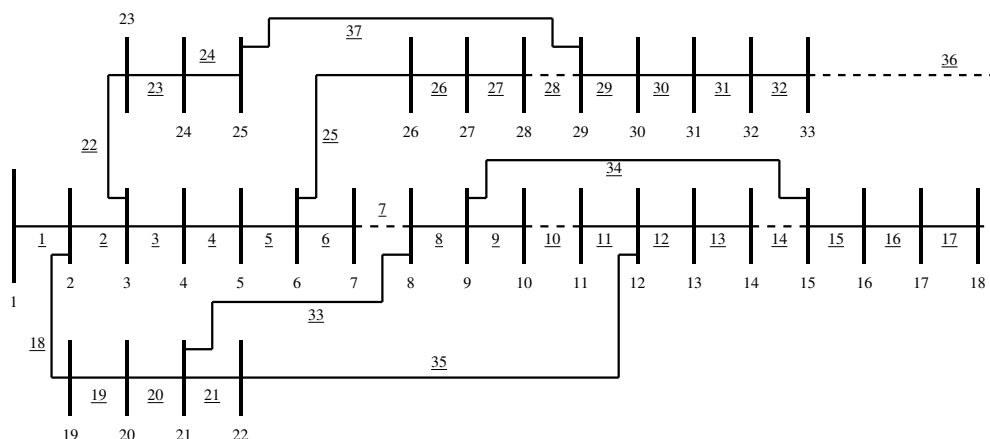
Tabela 2 - Índices para o algoritmo de Prim

Posição	Ramo	Índice (kW)	Posição	Ramo	Índice (kW)	Posição	Ramo	Índice (kW)
1	1	3838.2908	14	26	491.3839	27	12	220.5993
2	2	2707.2281	15	6	441.6340	28	15	209.0737
3	22	1336.6717	16	27	430.6359	29	13	159.8200
4	3	1250.0327	17	30	423.6499	30	16	148.5990
5	23	1239.3359	18	21	408.8188	31	17	88.0417
6	4	1125.3030	19	37	380.5663	32	9	70.3654
7	5	1061.3271	20	28	368.3709	33	32	62.2692
8	18	1019.3075	21	8	362.0683	34	14	39.6555
9	19	927.6908	22	33	320.9666	35	11	34.6712
10	20	825.0575	23	35	315.2824	36	10	10.3306
11	24	806.5686	24	31	272.4273	37	36	2.1632
12	29	626.5399	25	7	241.3765			
13	25	552.0299	26	34	230.5653			

Fonte: próprio autor

Os ramos são fechados na seguinte ordem: 1, 2, 22, 3, 23, 4, 5, 18, 19, 20, 24, 29, 25, 26, 6, 27, 30, 21, 37, 8, 33, 35, 31, 34, 12, 15, 13, 16, 17, 9, 32 e 11. Os ramos que permanecem abertos são o 7, 10, 14, 28 e 36. A solução tem função objetivo igual a 90,0084 (\$/1000), que foi calculada utilizando a equação (12) e Perdas Ativas na Rede de 33,92 kW, 142,42 kW e 503,49 kW para cada nível de demanda. A Figura 2 mostra como a topologia do sistema fica após o algoritmo de Prim. Pode-se verificar que a função objetivo diminui de 130,47 para 90,0084 (\$/1000).

Figura 2 - Configuração Radial do Sistema de 33 barras obtida com o algoritmo de Prim.



Fonte: Elaborado pelo autor

A ideia de usar o algoritmo de Prim está inspirada nas conclusões de Merlin e Back (1975). Assim, existe a certeza que na prática a topologia com menores perdas é a topologia com todos os ramos fechados. Portanto, uma topologia radial de qualidade deve ser aquela topologia que produz as menores variações na redistribuição dos fluxos de potência ativa do sistema com todos

os ramos fechados. Dessa forma, uma topologia radial de qualidade deve preservar, na medida do possível, na topologia aqueles ramos que possuem os maiores valores de fluxo de potência no sistema malhado. Assim, usando esses valores de fluxo de potência como pesos, o algoritmo de Prim encontra uma topologia radial de qualidade. Em outras palavras, gera a árvore geradora máxima usando os valores de fluxo de potência como pesos.

Uma vantagem dessa proposta é que precisa resolver apenas quatro problemas de fluxo de carga para gerar uma topologia radial de qualidade (um fluxo de carga malhado para encontrar os pesos e três problemas de fluxo de carga radial para encontrar a função objetivo da proposta de solução radial).

3.2.2 Heurística para Alocação de Bancos de Capacitores

Utilizando a solução radial obtida com o algoritmo de Prim simula-se a alocação de um capacitor fixo de 300 kVAr em cada uma das barras do sistema e calcula-se o valor da função objetivo utilizando a relação (27). Por exemplo, testa-se a alocação de um capacitor fixo de 300 kVAr na barra 1 e armazena-se o valor da função objetivo, testa-se a alocação de um capacitor fixo de 300 kVAr na barra 2 e armazena-se o valor da função objetivo, até que todas as barras do sistemas sejam testadas e todos os valores obtidos com a função objetivo forem armazenados. Em seguida, seleciona-se as melhores barras para se alocar capacitores de acordo com as funções objetivo armazenadas. Ordena-se as melhores barras de acordo com a função objetivo obtida, as barras escolhidas serão utilizadas pelo algoritmo heurístico construtivo (AHC) para encontrar a melhor configuração radial inicial com alocação de capacitores fixos e chaveados.

Para o sistema teste de 33 barras foram selecionadas as 10 melhores barras, desta forma elas se tornam candidatas a receber alocação de capacitores e são ordenadas de acordo com a sua função objetivo, essas barras são: 31, 32, 33, 30, 29, 25, 24, 23, 8 e 9. Após este procedimento essas barras serão utilizadas no AHC. Assim, neste caso são resolvidos $33(3) = 99$ problemas de fluxo de carga radial.

3.2.2.1 Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC)

A ideia do AHC é ir adicionando um banco de capacitores fixo ou chaveado em cada passo. Se a adição de um banco melhora a função objetivo, então deve-se continuar o processo tentando adicionar outro banco de capacitor. O processo termina quando a tentativa de adicionar um novo banco de capacitores não melhora mais a qualidade da função objetivo por um número determinado de vezes.

Quando se implementa o AHC na alocação de bancos inicialmente são conhecidas as perdas para os 3 níveis de demanda obtido após processar 3 problemas de fluxo de carga da topologia

radial encontrada pelo Prim. Essa informação é importante, supõe-se que esses valores são iguais a P_{p1} , P_{p2} e P_{p3} (carga leve, normal e elevada, respectivamente). Então, tem-se que as barras 31, 32, 33, 30, 29, 25, 24, 23, 8 e 9 são escolhidas para alocar bancos. Assim para obter a informação de qualidade de alocar banco fixo ou chaveado na barra 31 é feito o seguinte:

- Resolve-se 3 problemas de fluxo de carga para cada nível de carga simulando a alocação de um banco na barra 31 em cada nível de carga. Os valores obtidos serão iguais a P_1 , P_2 e P_3 (carga leve, normal e elevada, respectivamente).
- Com a informação anterior pode-se encontrar o valor da função objetivo de cada uma das 4 propostas de alocação de banco na barra 31 que são as seguintes: $[0\ 0\ 1]$, $[0\ 1\ 1]$, $[1\ 0\ 1]$ e $[1\ 1\ 1]$. Assim, deve-se encontrar o valor da função objetivo para cada uma das quatro propostas e armazenar a melhor proposta. Assim, a função objetivo para cada uma das propostas se calcula da seguinte forma:

$$[0\ 0\ 1] \rightarrow v = 1000 + 1200 + 60 [P_{p1} + 6.76 P_{p2} + P_3] \text{ (banco alocado chaveado).}$$

$$[0\ 1\ 1] \rightarrow v = 1000 + 1200 + 60 [P_{p1} + 6.76 P_2 + P_3] \text{ (banco alocado chaveado).}$$

$$[1\ 0\ 1] \rightarrow v = 1000 + 1200 + 60 [P_1 + 6.76 P_{p2} + P_3] \text{ (banco alocado chaveado).}$$

$$[1\ 1\ 1] \rightarrow v = 1000 + 900 + 60 [P_1 + 6.76 P_2 + P_3] \text{ (banco alocado fixo).}$$

Se nenhuma proposta melhorar a qualidade da função objetivo então os valores das perdas P_{p1} , P_{p2} e P_{p3} continuam os mesmos.

O processo é repetido para todas as barras candidatas e a melhor proposta é escolhida. Supõe-se que a proposta $[0\ 0\ 1]$ de alocação de bancos na barra 31 é a melhor. Então para a próxima iteração os valores de P_{p1} , P_{p2} e P_{p3} seriam os seguintes: $P_{p1} = P_{p1}$, $P_{p2} = P_{p2}$ e $P_{p3} = P_3$.

De maneira geral o AHC assume a seguinte estrutura:

Inicialização: Selecione as melhores barras para se alocar bancos de capacitores B_c , $c = 1, \dots, c_{max}$, onde B_c é o conjunto de barras selecionadas para receber alocação de capacitores e c_{max} é a quantidade de barras selecionadas para receber alocação de capacitores. Como solução inicial x utilize a topologia radial reconfigurada pelo algoritmo de prim;

Repita os passos seguintes enquanto $k < 100$:

1. Faça $c \leftarrow 1$;
2. Repita os passos a seguir até $c = c_{max}$:
 - (a) Simule a alocação de um banco na barra, encontre o valor da função objetivo de cada uma das propostas de adição de capacitores e armazene a melhor solução x' com o menor valor de função objetivo;

- (b) Se a solução x' é melhor que x , faça $x \leftarrow x'$ e $c \leftarrow c + 1$;
- (c) Se a solução x' não é melhor que x , faça $c \leftarrow c + 1$ e $k \leftarrow k + 1$.

No final do processo é encontrado um ótimo local que é utilizado como solução inicial para iniciar o processo de busca tabu reformulada.

3.2.3 Representação de uma Proposta de Solução Radial com Alocação de Capacitores

No problema, a representação de uma proposta de solução quando são alocados bancos fixos e chaveados se representa em um vetor de tamanho $nl + 3nb$. As nl primeiras posições não variam, nas seguintes nb posições se indicam os bancos operando em carga leve, nas seguintes nb posições se indicam os bancos operando em carga normal e nas últimas nb posições se indicam os bancos operando em carga elevada.

Para saber se em uma barra foi instalado um banco fixo ou chaveado basta ver a proposta de solução nas 3 parcelas de tamanho nb onde se indicam os bancos que se encontram trabalhando. Por exemplo, supor que nas células correspondentes a barra 31 aparecem os números 1, 1 e 2. Isso significa que nessa barra se encontra instalado um banco fixo e um banco chaveado. O banco fixo opera nos 3 níveis de demanda e o banco chaveado opera apenas em demanda elevada (esse banco é desligado em carga normal e leve). Adicionalmente, deve-se observar que o número de bancos operando em demanda elevada deve ser sempre maior ou igual ao número de bancos operando em demanda normal e leve. Em outras palavras se em uma barra for instalado dois bancos fixos e/ou chaveados, então as diferentes formas de operação são as seguintes:

- 0, 0, 2 significa dois bancos chaveados;
- 1, 0, 2 significa dois bancos chaveados;
- 2, 0, 2 significa dois bancos chaveados;
- 0, 1, 2 significa dois bancos chaveados;
- 1, 1, 2 significa um bancos fixo e um banco chaveado;
- 2, 1, 2 significa um bancos fixo e um banco chaveado;
- 0, 2, 2 significa dois bancos chaveados;
- 1, 2, 2 significa um bancos fixo e um banco chaveado;
- 2, 2, 2 significa dois bancos fixos.

Portanto, ao gerar novas propostas de solução, deve-se respeitar essas possibilidades (em demanda leve ou demanda normal não podem operar mais bancos que em demanda elevada que indica o número de bancos instalados).

Após todos os procedimentos anteriormente apresentados, utilizando o Algoritmo de Prim é possível obter uma configuração radial de boa qualidade. Para o sistema teste de 33 barras foi obtida uma topologia radial em que as chaves 7, 10, 14, 28 e 36 estão abertas. Já para o AHC de alocação de capacitores a melhor solução encontrada para o sistema de 33 barras forneceu as seguintes alocações - n^o da barra (n^o de bancos carga leve, n^o de bancos carga normal, n^o de bancos carga elevada) - bancos fixos: 8(1,1,1), 30(1,1,1), 31(1,1,1), 32(1,1,1) e bancos chaveados: 33(0,1,1).

Assim, é aplicado o FC 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 (27) para o cálculo da FO encontrando o valor de 74,72 (em \$/1000). Assim, é encontrada uma solução inicial, ou seja, um sistema radial com redução de 42,73% no custo de operação. Com relação à topologia radial reconfigurada e com alocação de capacitores a representação da proposta de solução inicial utilizada é ilustrada na Tabela 3:

Tabela 3 - Representação da Proposta de Solução Inicial Radial com Alocação de Capacitores

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	1	2	3
1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0
4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
31	32	33	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33				
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1				

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 ESTRUTURA DE VIZINHANÇA: GERAÇÃO DE TOPOLOGIAS RADIAIS VIZINHAS

A vizinhança inicial deve ser gerada usando a seguinte estratégia: Assumimos que conhecemos uma proposta de solução radial com bancos de capacitores alocados e com a informação

do estado de operação dos bancos em cada nível de demanda.

Uma solução vizinha é uma topologia radial vizinha da topologia radial corrente e com a proposta de alocação de bancos modificada. Esse vizinho é encontrado da seguinte forma:

1. A topologia radial vizinha deve ser diferente da topologia radial corrente com apenas a abertura de um ramo e o fechamento de outro ramo e preservando a radialidade da proposta de solução. Dessa forma, quando é fechado um ramo aberto então deve ser aberto um ramo do laço formado com o fechamento do ramo aberto.
2. A mudança em alocação de bancos de capacitores deve ser implementada usando as seguintes estratégias:

- **Deslocamento de alocação de bancos instalados em uma barra para uma barra vizinha**

Deve-se deslocar os bancos instalados em uma barra para cada barra vizinha e verificar a possibilidade de aparecimento de um vizinho de melhor qualidade. O deslocamento deve ser feito mantendo a forma de alocação, isto é, sem mudar a forma de instalação dos bancos (fixos ou chaveados na barra).

- **Adicionar um banco em uma barra que já existem bancos instalados**

Nesse caso existem várias propostas de solução vizinhas. Supor que em uma barra existe a seguinte instalação: $[0 \ 0 \ 1]$. Portanto, existem as seguintes propostas de solução vizinhas: $[0 \ 0 \ 2]$, $[1 \ 0 \ 2]$, $[2 \ 0 \ 2]$, $[0 \ 1 \ 2]$, $[1 \ 1 \ 2]$, $[2 \ 1 \ 2]$, $[0 \ 2 \ 2]$, $[1 \ 2 \ 2]$ e $[2 \ 2 \ 2]$

Assim, neste caso existem 9 propostas de solução vizinhas. O número e a forma dessas propostas de solução vizinhas são as mesmas para qualquer outra proposta em que existe um banco alocado em uma barra, isto é, para as seguintes propostas de solução: $[0 \ 0 \ 1]$, $[1 \ 0 \ 1]$, $[0 \ 1 \ 1]$ e $[1 \ 1 \ 1]$.

Portanto, se em uma barra existe um banco instalado e independente da forma em que esses bancos operam em carga leve, normal e elevada, então existem 9 propostas de solução vizinhas. Observa-se que nas propostas $[1 \ 1 \ 2]$, $[2 \ 1 \ 2]$ e $[1 \ 2 \ 2]$ existe um banco fixo e um banco chaveado e em $[2 \ 2 \ 2]$ existem 2 bancos fixos. Nos outros casos existem 2 bancos chaveados.

Se em uma barra existem dois bancos instalados, então a adição de um novo banco originam 16 propostas de solução vizinhas.

- **Retirar um banco em uma barra em que já existe bancos instalados**

Nesse caso e aproveitando os argumentos do item anterior existem as seguintes alternativas:

- a) Se na barra existe um banco instalado, então se retira esse banco para todos os níveis de demanda e, portanto, existe apenas uma única proposta de solução vizinha.
- b) Se na barra existem dois bancos instalados, então a retirada de um banco gera quatro propostas de solução vizinhas na seguinte forma:
[0 0 1], [1 0 1], [0 1 1] e [1 1 1].
- c) Se na barra existem 3 bancos instalados, então a retirada de um banco gera 9 propostas de solução vizinhas na seguinte forma:
[0 0 2], [1 0 2], [2 0 2], [0 1 2], [1 1 2], [2 1 2], [0 2 2], [1 2 2] e [2 2 2].
- **Instalar um banco em uma barra do conjunto reduzido de barras previamente selecionado em que não foram instalados bancos**
Nesse caso, a adição de um banco em uma barra que não tem bancos instalados geram 4 propostas de solução vizinhas na seguinte forma:
[0 0 1], [1 0 1], [0 1 1] e [1 1 1].

Para ilustrar o tamanho da vizinhança usamos a Figura 2 que corresponde a configuração radial inicial obtida com o algoritmo de Prim para o sistema de 33 barras. Utilizando a topologia radial com alocação de capacitores encontrada inicialmente temos um banco fixo na barra 8, um banco fixo na barra 30, um banco fixo na barra 31, um banco fixo na barra 32 e um banco chaveado na barra 33 e as barras 31, 32, 33, 30, 29, 25, 24, 23, 8 e 9 são selecionadas para receber alocação de capacitores.

O número de soluções vizinhas pode ser determinada da seguinte forma:

- a) O ramo 7 pode ser fechado e pode ser aberto o ramo 6 e 33 de forma independente. Portanto existem duas topologias radiais vizinhas. O mesmo raciocínio pode ser usado quando os ramos 10, 14, 28 e 36 são fechados. Portanto, existem 10 topologias radiais vizinhas.
- b) Para cada topologia radial identificada no item anterior existem as seguintes possibilidades de mudar a topologia de bancos:

Deslocamento de bancos para barras vizinhas:

- O banco da barra 8 pode ser deslocado para a barra 9, 7 ou 21 (3 vizinhos).
- O banco da barra 30 pode ser deslocado para a barra 29 ou 31 (2 vizinhos).
- Os bancos da barra 31 podem ser deslocados para a barra 30 ou 32 (2 vizinhos).
- O banco da barra 32 pode ser deslocado para a barra 31 ou 33 (2 vizinhos).
- O banco da barra 33 pode ser deslocado para a barra 18 ou 32 (2 vizinhos).

Adicionar um banco em uma barra em que já existe bancos instalados:

- Adicionamos um banco adicional na barra 8, totalizando 2 bancos (9 vizinhos).
- Adicionamos um banco adicional na barra 30, totalizando 2 bancos (9 vizinhos).
- Adicionamos um banco adicional na barra 31, totalizando 2 bancos (9 vizinhos).
- Adicionamos um banco adicional na barra 32, totalizando 2 bancos (9 vizinhos).
- Adicionamos um banco adicional na barra 33, totalizando 2 bancos (9 vizinhos).

Retirar um banco em uma barra em que já existe bancos instalados:

- Retiramos um banco na barra 8 (1 vizinho).
- Retiramos um banco na barra 30 (1 vizinho).
- Retiramos um banco na barra 31 (1 vizinho).
- Retiramos um banco na barra 32 (1 vizinho).
- Retiramos um banco na barra 33 (1 vizinho)

Instalar um banco em uma barra do conjunto reduzido de barras previamente selecionado em que não foram instalados bancos.

- Adicionamos um banco na barra 29 (4 vizinhos).
- Adicionamos um banco na barra 25 (4 vizinhos).
- Adicionamos um banco na barra 24 (4 vizinhos).
- Adicionamos um banco na barra 23 (4 vizinhos).
- Adicionamos um banco na barra 9 (4 vizinhos)

Portanto, a proposta de solução corrente tem $10(81) = 810$ propostas de solução vizinhas e deve-se resolver 2430 problemas de fluxo de carga radial.

3.4 ALGORITMO DE BUSCA TABU PROPOSTO

Foram descritas as formas de se representar uma proposta de solução, a geração de uma topologia inicial eficiente reconfigurada e com alocação de capacitores, a codificação da topologia inicial e a forma como uma proposta de solução vizinha é gerada. Com esses resultados é possível dar início ao processo de Busca Tabu Reformulada.

É preciso definir alguns parâmetros como:

- O tamanho da lista k_d

- O tamanho da lista k_e

A lista k_d identifica o número de soluções nas últimas k_d transições do algoritmo e devem ser armazenadas para verificar se a solução vizinha já foi visitada, esta lista evita o processo de ciclagem. Por outro lado, a lista k_e é a quantidade de soluções de elite que o algoritmo deve armazenar.

A lista k_d começa contendo apenas uma solução, que é a proposta de solução inicial. Partindo da proposta de solução inicial, transforma-se essa solução em uma solução corrente p_c . Nas primeiras k_d iterações o processo foi feito da seguinte maneira:

1. Identificar e avaliar todas as soluções vizinhas da solução corrente calculando sua respectiva função objetivo utilizando a relação (27).
2. Ordenar as soluções vizinhas encontradas de acordo com a FO obtida. A primeira da lista será a melhor solução vizinha.
3. Realizar a transição para a solução vizinha melhor classificada desde que essa solução vizinha não se encontra na lista das últimas k_d soluções vizinhas escolhidas no processo de transição e que se encontram armazenadas para verificação de ciclagem. Seja p_e a melhor solução vizinha escolhida, então fazer $p_c = p_e$.
4. Atualizar a lista k_d . Se o número de iterações for igual ao tamanho da lista k_d especificado inicialmente então pare, ordene as soluções da lista k_d de acordo com a respectiva FO e separe as k_e melhores soluções para a Lista de Elite. Em caso contrário volte ao passo 1.

Após as k_d primeiras iterações temos uma lista k_d com k_d soluções, com as melhores soluções armazenadas na lista k_d montamos a lista de elite contendo k_e soluções de boa qualidade. Porém o processo é continuado, da seguinte forma:

1. Identificar e avaliar todas as solução vizinhas da solução corrente calculando sua respectiva função objetivo utilizando a relação (27).
2. Ordenar as soluções vizinhas encontradas de acordo com a FO obtida. A primeira da lista será a melhor solução vizinha.
3. Atualizar a lista das últimas k_d soluções geradas no processo de transição do algoritmo, substituindo uma solução vizinha que já estava na lista k_d pela nova solução vizinha encontrada, desde que essa solução vizinha não se encontra na lista das últimas k_d soluções vizinhas escolhidas no processo de transição e que se encontram armazenadas para verificação de ciclagem. Seja p_e a melhor solução vizinha escolhida, então fazer $p_c = p_e$.

4. Atualizar a lista de soluções de elite. Se a FO de p_c for melhor que a FO da pior solução da Lista de Elite, então fazer a substituição, se não continue.
5. Se o critério de parada for satisfeito então pare, e apresente a melhor solução encontrada da Lista de Elite. Em caso contrário voltar ao passo 1.

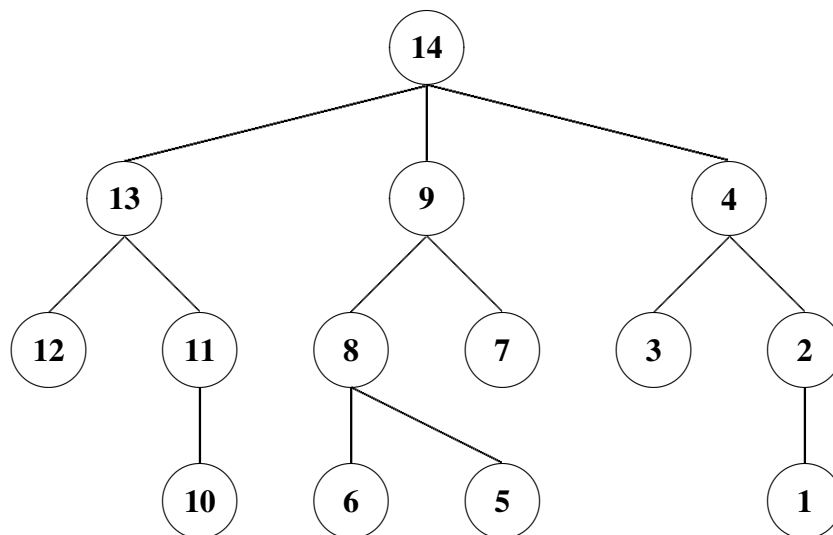
4 ALGORITMO DE FLUXO DE CARGA RADIAL

O método para a solução do problema de fluxo de carga em sistemas radiais utilizado neste trabalho foi desenvolvido por Shirmohammadi *et al.* (1988), e é conhecido como método de varredura. O método *backward-forward sweep*, como o próprio nome diz faz uma varredura, saindo das barras da subestação do sistema em direção às barras extremas e vice-versa. Existem vários métodos para resolução de fluxo de carga, mas este método foi desenvolvido para ser utilizado tanto na análise estática de redes radiais quanto em redes fracamente malhadas, bem como é base para inúmeras generalizações.

4.1 FLUXO DE CARGA RADIAL DE TIPO VARREDURA

Para aplicar o método de varredura é preciso renumerar e reordenar as barras e ramos na forma de camadas. A Figura 3 ilustra um sistema de distribuição radial de 14 barras com a numeração original das barras.

Figura 3 - Sistema radial de 14 barras antes da ordenação

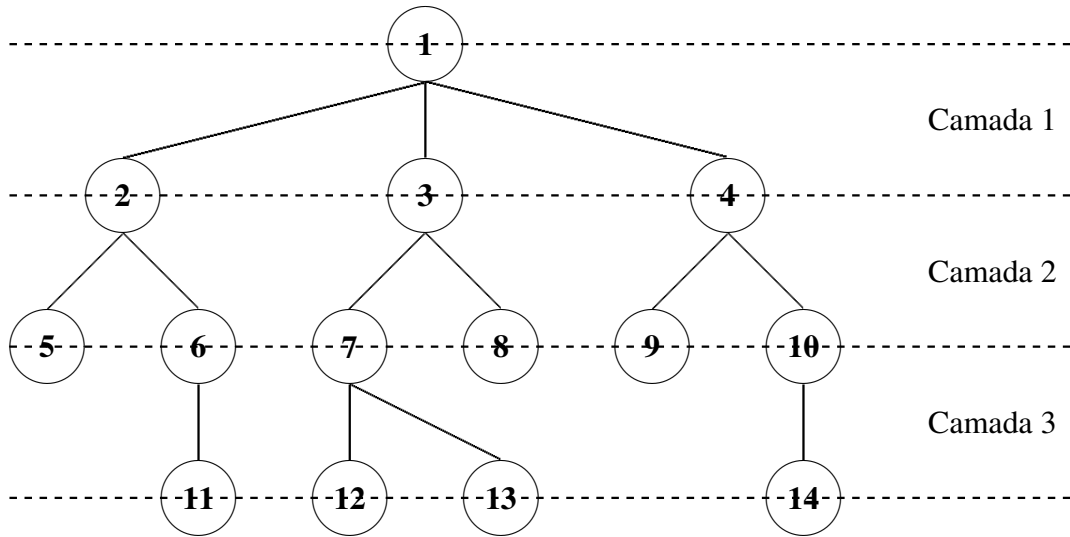


Fonte: Elaborado pelo autor.

O processo de reordenamento é iniciado pela subestação (barra de saída). Na primeira camada são renumeradas as barras que são conectadas à subestação (barras de chegada) através dos ramos. Na próxima camada são renumeradas as barras que são conectadas às barras de

chegada da primeira camada e as outras são determinadas da mesma maneira. A Figura 4 ilustra o sistema após a ordenação.

Figura 4 - Sistema radial de 14 barras após a ordenação



Fonte: Elaborado pelo autor.

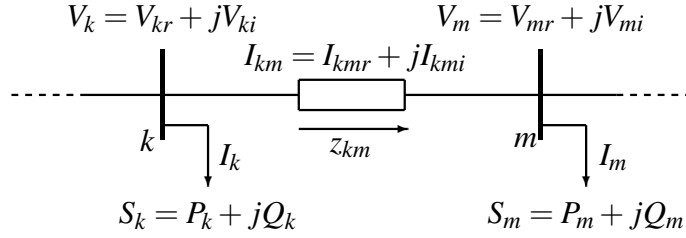
O processo de resolução é iniciado escolhendo um valor para os módulos de tensão nas barras em que normalmente é escolhida a mesma tensão da subestação. Assim que são determinadas as tensões em todas as barras é possível conhecer a corrente de carga de todas as barras e as correntes em todos os ramos do sistema. O cálculo é iniciado partindo das últimas barras de cada ramo em sentido à subestação (processo *backward*), onde é feito o somatório das correntes das cargas, encontrando a corrente total da rede de distribuição e com o cálculo das correntes nos ramos é possível calcular as perdas ativas e reativas do sistema de forma aproximada.

Utilizando-se os valores de correntes de ramos calculadas no processo *backward* e partindo da subestação, calculam-se os novos valores das tensões em todas as barras do sistema (processo *forward*). Com os novos valores de tensão das barras, determinam-se, de forma aproximada, as correntes de carga nas barras e as correntes em todos os ramos do sistema. Assim que determinadas todas as correntes, recalculam-se as perdas ativas e reativas da rede. O procedimento acima é repetido até que o critério de parada seja satisfeito.

4.1.1 Cálculo da Corrente de Carga

A Figura 5 apresenta um trecho de um sistema de distribuição entre duas barras. A carga da barra k é representada na forma $S_k = P_k + jQ_k$ e a tensão na barra k por $V_k = V_{kr} + jV_{ki}$.

Figura 5 - Ramo de um sistema de distribuição



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pretende-se encontrar a corrente da carga I_k . Sabe-se que:

$$I_k = \left(\frac{S_k}{V_k} \right)^* \quad (28)$$

Portanto, temos que

$$I_k^* = \frac{P_k + jQ_k}{V_{kr} + jV_{ki}} = \frac{P_k + jQ_k}{(V_{kr} + jV_{ki})} \cdot \frac{(V_{kr} - jV_{ki})}{(V_{kr} - jV_{ki})} \quad (29)$$

$$I_k = \frac{(P_k + jQ_k)(V_{kr} - jV_{ki})}{(V_{kr}^2 + V_{ki}^2)} = \frac{(P_k V_{kr} + Q_k V_{ki}) + j(P_k V_{ki} - Q_k V_{kr})}{(V_{kr}^2 + V_{ki}^2)} \quad (30)$$

Separando o resultado da equação (30) em parte real e imaginária obtém-se:

$$I_{kr} = \frac{(P_k V_{kr} + Q_k V_{ki})}{(V_{kr}^2 + V_{ki}^2)} \quad (31)$$

$$I_{ki} = \frac{(P_k V_{ki} - Q_k V_{kr})}{(V_{kr}^2 + V_{ki}^2)} \quad (32)$$

4.1.2 Cálculo da Corrente no Ramo

A corrente que flui no ramo é dada por

$$I_{km} = I_{kmr} + jI_{kmi} \quad (33)$$

em que, I_{kmr} é a parte real e I_{kmi} é a parte imaginária da corrente no ramo km .

O processo *backward sweep* reduz-se na somatória das correntes das cargas para que se determine as correntes dos ramos. Então, partindo das últimas barras de cada ramo em sentido à subestação, pode-se calcular a corrente em cada ramo I_{km} da seguinte maneira:

$$I_{km} = I_m + \sum_{l \in \Omega_l} I_{ml} \quad (34)$$

sendo m a barra mais distante da subestação no ramo km . I_m é a corrente absorvida pela carga na barra m . No termo do somatório, Ω_l corresponde ao conjunto de barras ligados à barra m .

4.1.3 Cálculo das Tensões nas Barras

O processo *forward sweep* parte da subestação em direção as últimas barras do sistema para assim calcular as tensões nas barras. No caso da Figura 3 a tensão na barra m é calculada a partir da tensão na barra k , que é considerada mais próxima da subestação. Portanto, tendo a tensão na barra k , $V_k = V_{kr} + jV_{ki}$, e a corrente no ramo km , $I_{km} = I_{kmr} + jI_{kmi}$, assim é calculada a tensão na barra m , $V_m = V_{mr} + jV_{mi}$ da seguinte forma:

Por definição temos que

$$V_k = V_{kr} + jV_{ki} = V_m + (r_{km} + jx_{km})(I_{kmr} + jI_{kmi}) \quad (35)$$

$$V_{kr} + jV_{ki} = V_{mr} + jV_{mi} + (r_{km}I_{kmr} - x_{km}I_{kmi}) + j(x_{km}I_{kmr} + r_{km}I_{kmi}) \quad (36)$$

Separando a relação (36) em parte real e imaginária, obtém-se

$$V_{mr} = V_{kr} - r_{km}I_{kmr} + x_{km}I_{kmi} \quad (37)$$

$$V_{mi} = V_{ki} - r_{km}I_{kmi} - x_{km}I_{kmr} \quad (38)$$

Se conhecidos os valores de V_k e I_{km} é possível calcular V_m usando (37) e (38).

4.1.4 Cálculo das Perdas no Sistema de Distribuição

Após o cálculo das tensões e correntes do sistema, é possível deduzir as equações das perdas ativas e reativas na linha e no sistema. As perdas para um ramo como na Figura 3 podem ser calculadas da seguinte forma:

$$S_{km} = P_{kmp} + jQ_{kmp} = z_{km} \cdot I_{km}^2 = (r_{km} + jx_{km}) \cdot I_{km}^2 \quad (39)$$

Da relação (39) determina-se a perda ativa e reativa no ramo $k - m$:

$$P_{kmp} = r_{km} \cdot I_{km}^2 \quad (40)$$

$$Q_{kmp} = x_{km} \cdot I_{km}^2 \quad (41)$$

Pode-se generalizar as equações (40) e (41) para todos os ramos do sistema como segue:

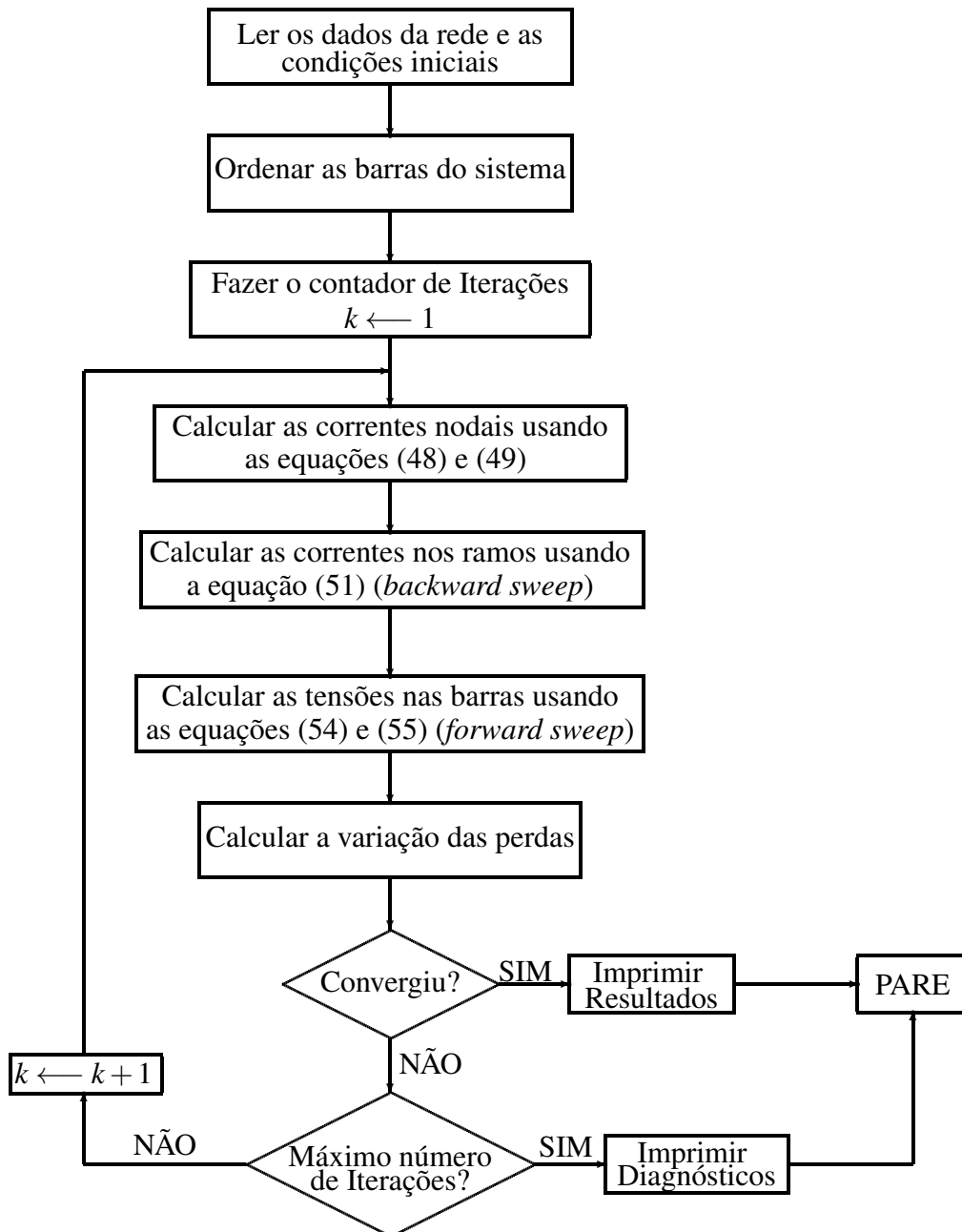
$$P_t = \sum_{(k,m) \in \Omega_r} r_{km} \cdot I_{km}^2 \quad (42)$$

$$Q_t = \sum_{(k,m) \in \Omega_r} x_{km} \cdot I_{km}^2 \quad (43)$$

em que Ω_r representa o conjunto de todos os ramos do sistema.

A Figura 6 apresenta o fluxograma geral do algoritmo de Fluxo de Carga para sistemas de distribuição radiais utilizando o método de varredura.

Figura 6 - Algoritmo de fluxo de carga de varredura para redes radiais



Fonte: Shirmohammadi *et al.* (1988).

4.2 IMPLEMENTAÇÃO DO FLUXO DE CARGA RADIAL DE VARREDURA EM LINGUAGEM FORTRAN

4.2.1 Banco de Dados

O banco de dados deve ter todos os dados de um sistema de distribuição radial. Para ilustrar o problema usamos o banco de dados de uma topologia radial do sistema de 14 barras muito usado na literatura. Esses dados são mostrados nas Tabelas 4 e 5. Adicionalmente, deve-se mencionar que a topologia radial está constituída apenas pelos primeiros 13 ramos da Tabela 5 e, portanto, os 3 últimos ramos se encontram desativados.

Tabela 4 - Dados das barras do sistema de 14 barras

Barra	Pot. Ativa (KW)	Pot. Reativa Indutiva (KVar)	Pot. Reativa Capacitiva (KVar)
14	0,0	0,0	0,0
13	2000,0	1600,0	0,0
12	3000,0	1500,0	1100,0
11	2000,0	800,0	1200,0
10	1500,0	1200,0	0,0
9	4000,0	2700,0	0,0
8	5000,0	3000,0	1200,0
7	1000,0	900,0	0,0
6	600,0	100,0	600,0
5	4500,0	2000,0	3700,0
4	1000,0	900,0	0,0
3	1000,0	700,0	1800,0
2	1000,0	900,0	0,0
1	2100,0	1000,0	1800,0

Fonte: próprio autor

Tabela 5 - Dados dos ramos do sistema de 14 barras

Barra	Barra	Resistência (Ohms)	Reatância (Ohms)
14	13	7,50	10,0
13	12	8,0	11,0
13	11	9,0	18,0
11	10	4,0	4,0
14	9	11,0	11,0
9	8	8,0	11,0
9	7	11,0	11,0
8	6	11,0	11,0
8	5	8,0	11,0
14	4	11,0	11,0
4	3	9,0	12,0
4	2	8,0	11,0

2	1	4,0	4,0
12	6	4,0	4,0
7	3	4,0	4,0
10	1	9,0	12,0

Fonte: próprio autor

O programa computacional de fluxo de carga radial, usando o método da varredura, foi escrito em Fortran em módulos separados. O nome do programa é “fc.for” que faz leitura dos dados do arquivo que contém os dados chamado de “dados.dat” e imprime os resultados no arquivo que chamamos de “result.dat”.

4.2.2 Módulo de Leitura de Dados

O módulo de leitura de dados faz a leitura de todos os dados do problema e os dados das barras e das linhas do sistema de distribuição radial.

4.2.3 Módulo de Renumeração

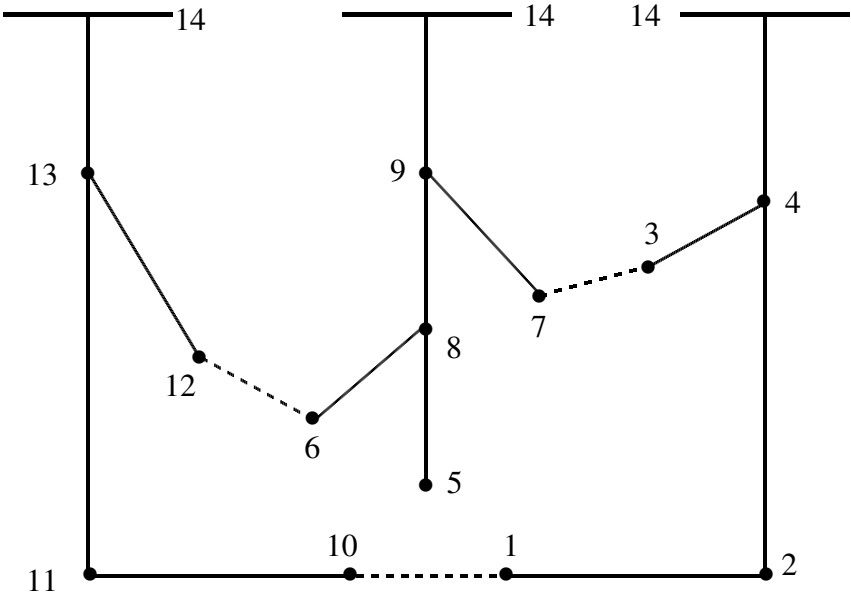
O módulo de renumeração é o mais importante do módulo de programação. Nesse módulo os vetores usados realizam as seguintes tarefas:

1. O vetor $naux1()$ de tamanho nl (numero de circuitos), é usado para identificar os ramos que já foram usados na identificação das barras de fronteira no processo de renumeração. Assim, $naux1 = 1$ significa que o ramo i ainda não foi usado para identificar uma barra da nova fronteira e $naux1(i) = 0$ significa que o ramo i já foi usado e, portanto, descartado para nova análise nesse módulo de programação.
2. O vetor $mna()$ identifica as barras da fronteira corrente no processo de renumeração. Assim, a primeira fronteira está representada apenas pela barra da subestação, a segunda fronteira está representada pelas barras ligadas com a subestação e, assim sucessivamente.
3. O vetor $mnb()$ identifica as barras da nova fronteira no processo de renumeração. Assim, conhecendo as barras da fronteira corrente (armazenados no vetor $mna()$), deve-se identificar as barras da nova fronteira e que estão formadas por todas as barras que tem ligação direta com as barras da fronteira corrente. Após identificar todas as barras da nova fronteira, deve-se atualizar a fronteira corrente, isto é, copiando os dados de $mnb()$ em $mna()$.
4. O vetor $mnr()$ armazena a nova renumeração das barras e, portanto, representa a informação principal do processo de renumeração. Esse vetor é gerado no duplo laço *DO* no

programa mostrado. Assim, por exemplo, o elemento $mnr(3) = 12$ indica que a barra 12 no banco de dados original vai ter a numeração 3 no sistema modificado.

Para ilustrar, apresenta-se a renumeração do sistema de 14 barras. A Figura 7 mostra o sistema original e que corresponde aos dados mostrados nas tabelas 4 e 5.

Figura 7 - Sistema Inicial de Distribuição (14 Barras)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o sistema de 14 barras, de acordo com o módulo de programação implementado, a nova numeração das barras deve assumir a forma mostrada na Figura 7. Assim, o vetor $mnr()$ assume a forma mostrada na Tabela 6.

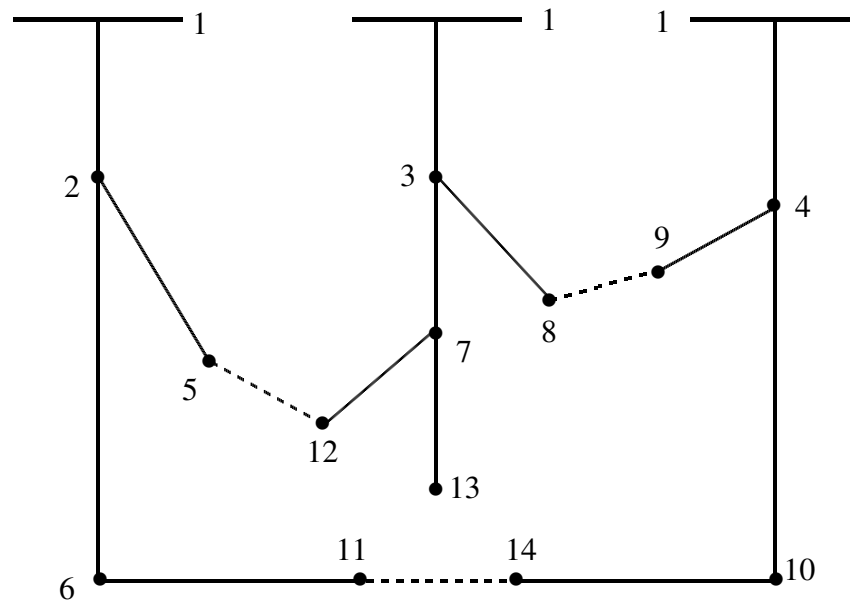
Tabela 6 - Forma do vetor $mnr()$

$mnr()$	14	13	9	4	12	11	8	7	3	2	10	6	5	1
Novo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Fonte: próprio autor

Portanto, o sistema elétrico de 14 barras com as barras renumeradas assume a forma mostrada na Figura 8.

Figura 8 - Sistema Inicial de Distribuição Renumerado (14 Barras)



Fonte: Elaborado pelo autor.

O processo de renumeração termina quando os dados de potência ativa e reativa das barras são mostradas com a nova numeração das barras e quando os dados dos circuitos são mostrados com a nova numeração. Adicionalmente, os dados dos circuitos devem ser ordenados de forma que para cada circuito deve-se indicar primeiro a barra de menor valor e na ordenação dos circuitos inicialmente devem ser mostrados os circuitos que saem da subestação e, esse ordenamento deve ser preservado em todos os circuitos. Esse novo ordenamento, que seria o correspondente ao mostrado na Figura 8, são mostrados nas tabelas 7 e 8.

Deve-se reiterar que é fundamental que cada circuito seja armazenado informando primeiro a barra de menor numeração (o primeiro circuito vai da barra 1 para a barra 2) os circuitos se encontrem ordenados de forma crescente com a numeração das barras (o circuito 1-2 é classificado antes que o circuito 2-5). Esse ordenamento é fundamental para o funcionamento adequado do módulo de fluxo de carga de varredura.

Tabela 7 - Dados das barras do sistema de 14 barras renumerado

Barra	Pot. Ativa (KW)	Pot. Reativa Indutiva (KVAr)	Pot. Reativa Capacitiva (KVAr)
1	0,0	0,0	0,0
2	2000,0	1600,0	0,0
3	4000,0	2700,0	0,0
4	1000,0	900,0	0,0
5	3000,0	1500,0	1100,0
6	2000,0	800,0	1200,0
7	5000,0	3000,0	1200,0

8	1000,0	900,0	0,0
9	1000,0	700,0	1800,0
10	1000,0	900,0	0,0
11	1500,0	1200,0	0,0
12	600,0	100,0	600,0
13	4500,0	2000,0	3700,0
14	2100,0	1000,0	1800,0

Fonte: próprio autor

Tabela 8 - Dados dos ramos renumerados e ordenados

Barra	Barra	Resistência (Ohms)	Reatância (Ohms)
1	2	7,50	10,0
1	3	11,0	11,0
1	4	11,0	11,0
2	5	8,0	11,0
2	6	9,0	18,0
3	7	8,0	11,0
3	8	11,0	11,0
4	9	9,0	12,0
4	10	8,0	11,0
6	11	4,0	4,0
7	12	11,0	11,0
7	13	8,0	11,0
10	14	4,0	4,0

Fonte: próprio autor

5 TESTES COM OS ALGORITMOS PROPOSTOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através de testes realizados pela aplicação do algoritmo de Busca Tabu Reformulada para resolver o problema de operação ótima dos sistemas de distribuição envolvendo simultaneamente a reconfiguração e alocação de bancos de capacitores em redes de energia elétricas radiais. A metodologia e os algoritmos desenvolvidos foram escritos em linguagem de programação FORTRAN 77 e todos os testes foram feitos utilizando um processador Intel(R) Core(TM) i7-7500U de 2,70 GHz e 8,00 GB de memória RAM.

Os quatro sistemas testes utilizados são: o sistema de 33 barras apresentado por Baran e Wu (1989a), o sistema de 70 barras, muito usado na literatura especializada (Baran e Wu (1989a, 1989b), Guimarães, Castro e Romero (2010)), o sistema de 84 barras apresentado por Chiou, Chang e Su (2005) e o sistema de 136 barras apresentado por Mantovani, Casari e Romero (2000). Os dados dos sistemas testados estão descritos no Anexo B.

Os testes foram realizados para analisar o custo de operação do sistema no período de um ano que opera em três níveis de carregamento (1 Leve; 2 Normal; 3 Pesado), o fator multiplicativo da demanda para cada carregamento ($S_1 = 0,5$; $S_2 = 1,0$ e $S_3 = 1,8$), o tempo de operação do sistema em cada nível de carregamento em horas ($T_1 = 1000$; $T_2 = 6760$ e $T_3 = 1000$), o custo da energia elétrica $K_e = 0,06$ (US\$/kWh), o custo de infraestrutura para instalar bancos de capacitores em uma barra é igual a $K_c = 1000$ (US\$/barra), são instalados bancos de 300 kVar. Um banco de 300 kVar fixo custa 900 US\$ e um banco de 300 kVar chaveado custa 1200 US\$.

No AHC, em todos os sistemas, foram selecionadas as 10 melhores barras para receber alocação de capacitores. Quando gera-se as soluções vizinhas, na parte em que são instalados bancos em barras de um conjunto reduzido de barras previamente selecionadas, para o sistema de 33 e 70 barras foram selecionadas 10 barras e para o sistema de 84 e 136 barras foram selecionadas 50 barras. Tanto no AHC quanto na vizinhança as barras foram escolhidas de acordo com o procedimento da seção 3.2.2.

O valor da função objetivo é apresentado na relação \$/1000 e o número máximo de iterações foi fixado em 300. Levando em conta os sistemas que foram usados, o tamanho da lista k_d foi fixada em 120 e o tamanho da lista k_e foi fixada em 20.

5.1 SISTEMA DE 33 BARRAS

A topologia base desse sistema é mostrada na Figura 1. Ele possui cinco chaves de interconexão normalmente abertas (caso base) que desconectam os ramos 33, 34, 35, 36 e 37 que ligam as barras 8-21, 9-15, 12-22, 18-33 e 25-29 respectivamente. A tensão de operação é de 12,66 kV.

No caso base, as perdas de potência ativa nos níveis de carregamento (leve, normal e pesado) e a função objetivo são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados do sistema de 33 barras - caso base

Configuração inicial (Ramos abertos)	FO (US\$/1000)
33, 34, 35, 36 e 37	130,4666
Nível de carregamento (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas (kW)
Leve	47,07077
Normal	202,67630
Pesado	757,28050

Fonte: próprio autor

A barra e o menor nível de tensão em cada carregamento no caso base são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Barras com menor tensão - caso base (sistema de 33 barras)

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Normal		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
18	0,95826	18	0,91309	18	0,87104

Fonte: próprio autor

Inicialmente calcula-se a função objetivo da topologia base considerando apenas as perdas, isto é, sem reconfiguração e sem alocação de bancos de capacitores. Em seguida, o sistema é reconfigurado com a aplicação do algoritmo de Prim e as chaves de interconexão dos ramos 7, 10, 14, 28 e 36 são abertas. As perdas de potência ativa e a função objetivo do sistema reconfigurado são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados sistema de 33 barras - reconfigurado.

Configuração corrente (Ramos abertos)	FO (US\$/1000)
7, 10, 14, 28 e 36	90,0084
Nível de carregamento (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas (kW)
Leve	33,92415
Normal	142,42760
Pesado	503,40580

Fonte: próprio autor

Após a reconfiguração com o algoritmo de Prim verifica-se que a nova topologia apresentou redução nas perdas de potência ativa em todos os níveis de carregamento e houve a redução da FO. A barra e o menor nível de tensão em cada carregamento neste caso são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Barras com menor tensão - Prim (sistema de 33 barras)

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Normal		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
33	0,96975	33	0,93779	33	0,90961

Fonte: próprio autor

Na próxima etapa, após a seleção das 10 melhores barras, o sistema reconfigurado é submetido a uma heurística para alocação de bancos de capacitores, onde foi encontrada uma solução inicial de boa qualidade que tem os seus resultados apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Proposta de Solução Inicial (Sistema de 33 Barras) - Reconfigurada e com Alocação de Capacitores

Configuração Inicial (Ramos abertos)	FO (US\$/1000)
7, 10, 14, 28 e 36	74,72218
Nível de carregamento (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas (kW)
Leve	27,59665
Normal	101,09660
Pesado	371,02630
Capacitores Fixos	Barra (nº de Bancos)
300 kVAr	8(1), 30(1), 31(1), 32(1)
Capacitores Chaveados	Barra (nº de Bancos)
300 kVAr	33(0,1,1)

Fonte: próprio autor

Os menores níveis de tensão em cada nível de carregamento são mostrados na Tabela 14.

Tabela 14 - Barras com menor tensão - Solução Inicial (sistema de 33 barras)

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Normal		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
18	0,98476	18	0,96090	33	0,94052

Fonte: próprio autor

Com a Proposta de Solução Inicial obtida e utilizando a vizinhança apresentada anterior-

mente, considerando que a lista reduzida utilizada pela vizinhança contém 10 barras consideradas atrativas, que foram selecionadas da mesma forma que na heurística para alocação de bancos de capacitores, submete-se o sistema ao algoritmo Busca Tabu Reformulada. O sistema resultante reconfigurado com alocação de bancos de capacitores é mostrado na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados sistema de 33 barras - Solução Final

Configuração Final (Ramos abertos)	FO (US\$/1000)
7, 9, 14, 32 e 37	69,07388
Nível de carregamento (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas (kW)
Leve	28,67179
Normal	97,11910
Pesado	372,70120
Capacitores Fixos	Barra (nº de Bancos)
300 kVAr	9(1), 30(3)
Capacitores Chaveados	Barra (nº de Bancos)
300 kVAr	-

Fonte: próprio autor

A barra e o menor nível de tensão em cada carregamento neste caso são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Barras com menor tensão - Solução final (sistema de 33 barras)

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Normal		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
33	0,98362	33	0,95696	32	0,93265

Fonte: próprio autor

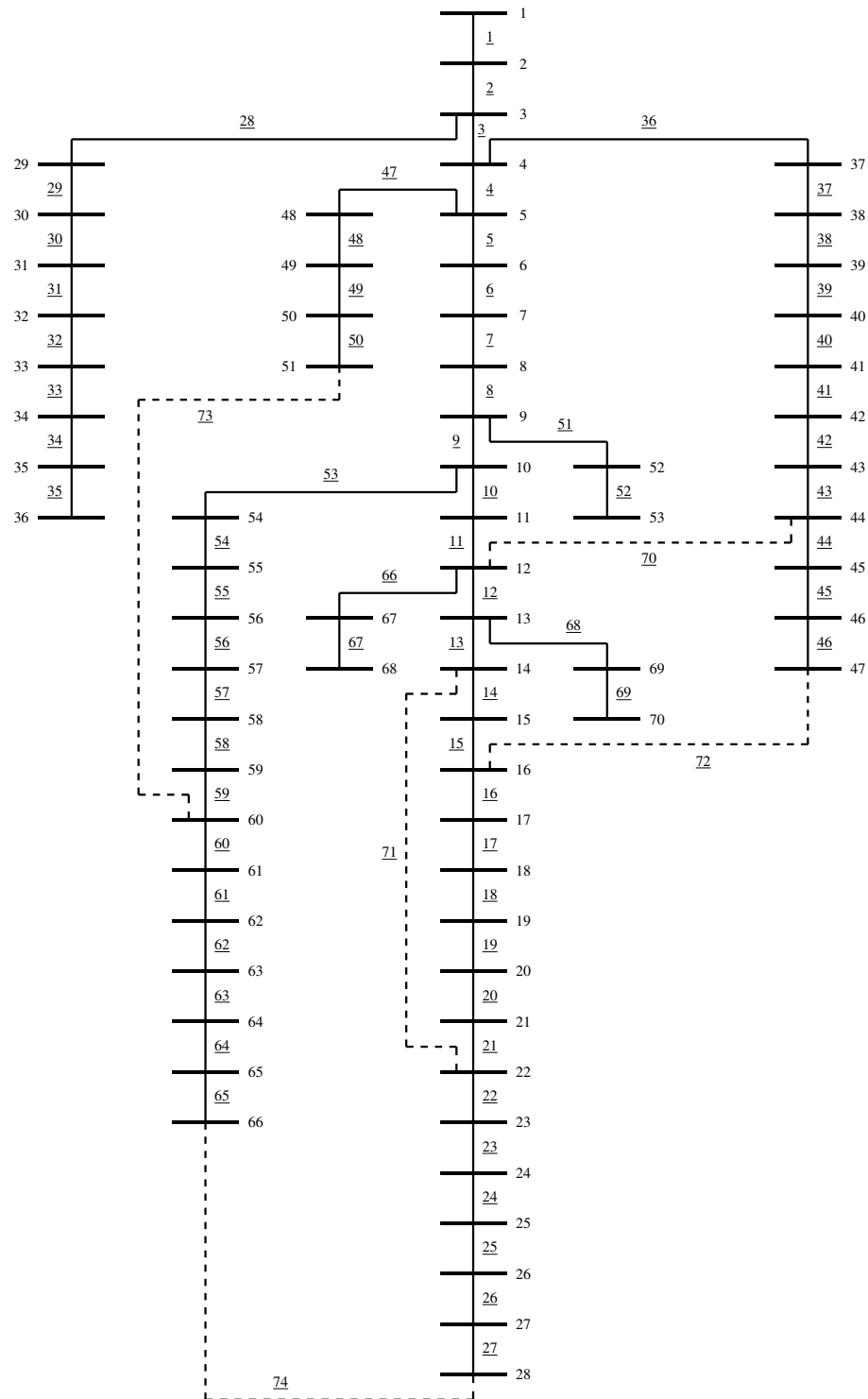
Diante dos resultados encontrados pela meta-heurística Busca Tabu Reformulada conclui-se que para o sistema de 33 barras, o método foi capaz de reduzir as perdas de potência ativa nos três níveis de carregamento e apesar dos custos com os capacitores o custo de operação do sistema reduziu em 47,06% comparado com o caso base. Em outras palavras, os custos de operação passam de 130,47 US\$ para 69,07 US\$ representando uma redução de 61 mil US\$ por ano. O teste para o sistema de 33 barras foi resolvido em 8,14 segundos.

5.2 SISTEMA DE 70 BARRAS

A topologia base desse sistema é mostrada na Figura 9. Ele possui cinco chaves de interconexão normalmente abertas (caso base) que desconectam os ramos 70, 71, 72, 73 e 74 que ligam as barras 12-44, 14-22, 16-47, 51-60 e 28-66 respectivamente. A tensão de operação é de

12,66 kV.

Figura 9 - Sistema de 70 barras (Caso Base)



Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso base, as perdas de potência ativa nos níveis de carregamento (leve, normal e pesado) e a função objetivo são apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17 - Resultados do sistema de 70 barras - caso base

Configuração inicial (Ramos abertos)	FO (US\$/1000)
70, 71, 72, 73 e 74	147,2110
Nível de carregamento (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas (kW)
Leve	51,85295
Normal	226,18570
Pesado	872,64810

Fonte: próprio autor

A barra e o menor nível de tensão em cada carregamento no caso base são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Barras com menor tensão - caso base (sistema de 70 barras)

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Normal		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
66	0,95577	66	0,90724	66	0,86081

Fonte: próprio autor

Inicialmente calcula-se a função objetivo da topologia base considerando apenas as perdas, isto é, sem reconfiguração e sem alocação de bancos de capacitores. Em seguida, o sistema é reconfigurado com a aplicação do algoritmo de Prim e as chaves de interconexão dos ramos 14, 21, 62, 70 e 73 são abertas. As perdas de potência ativa e a função objetivo do sistema reconfigurado são apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultados sistema de 70 barras - reconfigurado.

Configuração corrente (Ramos abertos)	FO (US\$/1000)
14, 21, 62, 70 e 73	109,5773
Nível de carregamento (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas (kW)
Leve	40,05117
Normal	171,20770
Pesado	628,87300

Fonte: próprio autor

Após a reconfiguração com o algoritmo de Prim pode-se notar que a nova topologia apresentou redução nas perdas de potência ativa em todos os níveis de carregamento e houve a redução da FO. A barra e o menor nível de tensão em cada carregamento neste caso são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Barras com menor tensão - Prim (sistema de 70 barras)

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Normal		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
62	0,96509	62	0,92752	62	0,89325

Fonte: próprio autor

Na próxima etapa, após a seleção das 10 melhores barras, o sistema reconfigurado é submetido a uma heurística para alocação de bancos de capacitores, onde foi encontrada uma solução inicial de boa qualidade que tem os seus resultados apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Proposta de Solução Inicial (Sistema de 70 Barras) - Reconfigurada e com Alocação de Capacitores

Configuração Inicial (Ramos abertos)	FO (US\$/1000)
14, 21, 62, 70 e 73	85,73515
Nível de carregamento (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas (kW)
Leve	32,12497
Normal	115,69510
Pesado	431,36220
Capacitores Fixos	Barra (n° de Bancos)
300 kVAr	60(1), 61(1), 62(1), 65(1)
Capacitores Chaveados	Barra (n° de Bancos)
300 kVAr	59(0,1,1), 62(0,0,1)

Fonte: próprio autor

A barra e o menor nível de tensão em cada carregamento após o sistema ser submetido à heurística são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Barras com menor tensão - solução inicial (sistema de 70 barras)

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Normal		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
62	0,97785	62	0,94499	62	0,91497

Fonte: próprio autor

Com a Proposta de Solução Inicial obtida e utilizando a vizinhança apresentada anteriormente, considerando que a lista reduzida utilizada pela vizinhança contém 10 barras consideradas atrativas, que foram selecionadas da mesma forma que na heurística para alocação de bancos de capacitores, submete-se o sistema ao algoritmo Busca Tabu Reformulada. O sistema

resultante reconfigurado com alocação de bancos de capacitores é mostrado na Tabela 23.

Tabela 23 - Resultados sistema de 70 barras - Solução Final

Configuração Final (Ramos abertos)	FO (US\$/1000)
15, 57, 62, 70 e 71	50,21308
Nível de carregamento (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas (kW)
Leve	20,36145
Normal	68,05492
Pesado	263,13870
Capacitores Fixos	Barra (nº de Bancos)
300 kVAr	62(3), 65(1)
Capacitores Chaveados	Barra (nº de Bancos)
300 kVAr	-

Fonte: próprio autor

A barra e o menor nível de tensão em cada carregamento da solução final são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Barras com menor tensão - solução final (sistema de 70 barras)

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Normal		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
63	0,99182	62	0,96396	62	0,93931

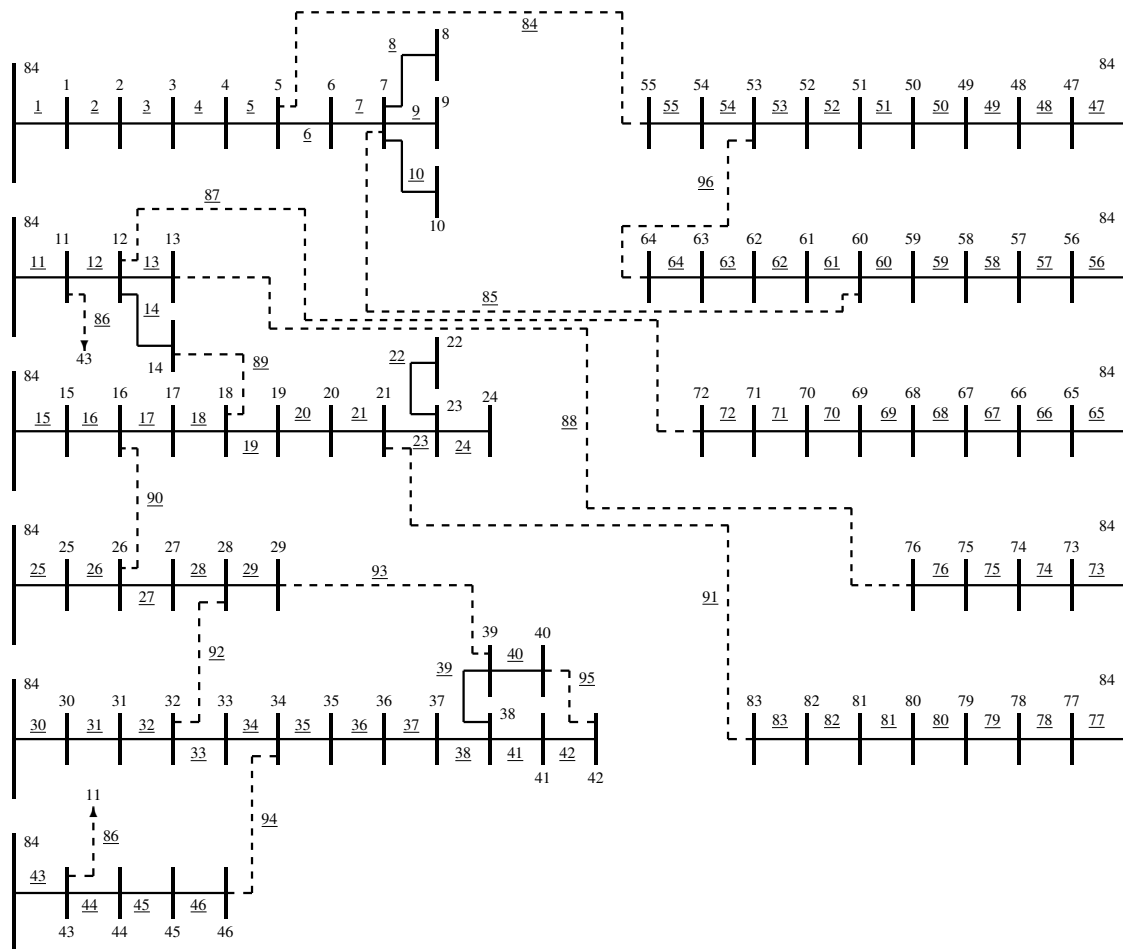
Fonte: próprio autor

Diante dos resultados encontrados pela meta-heurística Busca Tabu Reformulada conclui-se que para o sistema de 70 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 65,9% comparado com o caso base. Em outras palavras, os custos de operação passam de 147,21 (US\$/1000) para 50,21 (US\$/1000) representando uma redução de 97 mil US\$ por ano. O teste para o sistema de 70 barras foi resolvido em 23,5 segundos.

5.3 SISTEMA DE 84 BARRAS

A topologia base desse sistema é mostrada na Figura 10. Ele possui treze chaves de interconexão normalmente abertas (caso base) que desconectam os ramos 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95 e 96 que ligam as barras 5-55, 7-60, 11-43, 12-72, 13-76, 14-18, 16-26, 20-83, 28-32, 29-39, 34-46, 40-42 e 53-64 respectivamente. A tensão de operação é de 11,4 kV.

Figura 10 - Sistema de 84 barras (Caso Base)



Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso base, as perdas de potência ativa nos níveis de carregamento (leve, normal e pesado) e a função objetivo são apresentadas na Tabela 25.

Tabela 25 - Resultados do sistema de 84 barras - caso base

Configuração inicial (Ramos abertos)	FO (US\$/1000)
84, 85, 86, 87, 88, 89, 90 91, 92, 93, 94, 95 e 96	335,7174
Nível de carregamento (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas (kW)
Leve	127,21270
Normal	531,99660
Pesado	1871,78100

Fonte: próprio autor

A barra e o menor nível de tensão em cada carregamento no caso base são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 - Barras com menor tensão - caso base (sistema de 84 barras)

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Normal		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
9	0,96574	9	0,92852	9	0,89477

Fonte: próprio autor

Inicialmente calcula-se a função objetivo da topologia base considerando apenas as perdas, isto é, sem reconfiguração e sem alocação de bancos de capacitores. Em seguida, o sistema é reconfigurado com a aplicação do algoritmo de Prim e as chaves de interconexão dos ramos 7, 33, 39, 42, 63, 72, 82, 84, 86, 88, 89, 90 e 92 são abertas. As perdas de potência ativa e a função objetivo do sistema reconfigurado são apresentadas na Tabela 27.

Tabela 27 - Resultados sistema de 84 barras - reconfigurado

Configuração corrente (Ramos abertos)	FO (US\$/1000)
7, 33, 39, 42, 63, 72, 82 84, 86, 88, 89, 90 e 92	295,8587
Nível de carregamento (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas (kW)
Leve	113,77310
Normal	471,72580
Pesado	1628,33800

Fonte: próprio autor

Após a reconfiguração com o algoritmo de Prim pode-se notar que a nova topologia apresentou redução nas perdas de potência ativa em todos os níveis de carregamento e houve a redução da FO. A barra e o menor nível de tensão em cada carregamento neste caso são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 - Barras com menor tensão - Prim (sistema de 84 barras)

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Normal		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
9	0,97654	9	0,95175	9	0,93040

Fonte: próprio autor

Na próxima etapa, após a seleção das 10 melhores barras, o sistema reconfigurado é submetido a uma heurística para alocação de bancos de capacitores, onde foi encontrada uma solução inicial de boa qualidade que tem os seus resultados apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 - Proposta de Solução Inicial (Sistema de 84 Barras) - Reconfigurada e com Alocação de Capacitores

Configuração Inicial (Ramos abertos)	FO (US\$/1000)
7, 33, 39, 42, 63, 72, 82 84, 86, 88, 89, 90 e 92	277,66170
Nível de carregamento (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas (kW)
Leve	105,50800
Normal	409,85780
Pesado	1458,21400
Capacitores Fixos	Barra (nº de Bancos)
300 kVAr	8(1), 9(2), 10(1), 21(5), 71(5)
Capacitores Chaveados	Barra (nº de Bancos)
300 kVAr	-

Fonte: próprio autor

A barra e o menor nível de tensão em cada carregamento após o sistema ser submetido à heurística são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 - Barras com menor tensão - solução inicial (sistema de 84 barras)

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Normal		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
55	0,97938	55	0,95767	55	0,93925

Fonte: próprio autor

Com a Proposta de Solução Inicial obtida e utilizando a vizinhança apresentada anteriormente, considerando que a lista reduzida utilizada pela vizinhança contém 50 barras consideradas atrativas, que foram selecionadas da mesma forma que na heurística para alocação de bancos de capacitores, submete-se o sistema ao algoritmo Busca Tabu Reformulada. O sistema resultante reconfigurado com alocação de bancos de capacitores é mostrado na Tabela 31.

Tabela 31 - Resultados sistema de 84 barras - Solução Final

Configuração Final (Ramos abertos)	FO (US\$/1000)
7, 34, 38, 42, 55, 62, 72 83, 86, 88, 89, 90 e 92	257,12630
Nível de carregamento (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas (kW)
Leve	90,98803
Normal	330,91350
Pesado	1254,14200
Capacitores Fixos	Barra (nº de Bancos)
300 kVAr	6(4), 7(4), 13(4) 20(6), 28(4) 53(6), 71(5), 79(5)

Capacitores Chaveados	Barra (n^o de Bancos)
300 kVAr	-

Fonte: próprio autor

A barra e o menor nível de tensão em cada carregamento da solução final são apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 - Barras com menor tensão - solução final (sistema de 84 barras)

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Normal		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
76	0,99123	82	0,97786	62	0,96104

Fonte: próprio autor

Diante dos resultados encontrados pela meta-heurística Busca Tabu Reformulada conclui-se que 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 com os capacitores o custo de operação do sistema reduziu em 23,40% comparado com o caso base. Em outras palavras, os custos de operação passam de 335,72 (US\$/1000) para 257,13 (US\$/1000) representando uma redução de 78,6 mil US\$ por ano. O teste para o sistema de 84 barras foi resolvido em 885,296 segundos.

5.4 SISTEMA DE 136 BARRAS

O sistema possui 21 chaves de interconexão normalmente abertas (caso base) que desconectam os ramos 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155 e 156 que ligam as barras 7-73, 9-24, 15-83, 38-135, 25-51, 50-96, 55-98, 62-120, 66-79, 79-131, 84-135, 91-104, 90-129, 90-103, 92-104, 92-132, 96-120, 110-47, 126-76, 128-77 e 135-98 respectivamente. A tensão de operação é de 13,8 kV.

No caso base, as perdas de potência ativa nos níveis de carregamento (leve, normal e pesado) e a função objetivo são apresentadas na Tabela 33.

Tabela 33 - Resultados do sistema de 136 barras - caso base

Configuração inicial (Ramos abertos)	FO (US\$/1000)
136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155 e 156	201,6309
Nível de carregamento (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas (kW)
Leve	77,00491
Normal	320,36360
Pesado	1117,85200

Fonte: próprio autor

A barra e o menor nível de tensão em cada carregamento no caso base são apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 - Barras com menor tensão - caso base (sistema de 136 barras)

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Normal		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
116	0,96690	116	0,93065	117	0,89823

Fonte: próprio autor

Inicialmente calcula-se a função objetivo da topologia base considerando apenas as perdas, isto é, sem reconfiguração e sem alocação de bancos de capacitores. Em seguida, o sistema é reconfigurado com a aplicação do algoritmo de Prim e as chaves de interconexão dos ramos 9, 35, 49, 51, 54, 90, 96, 106, 126, 135, 136, 138, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151 e 155 são abertas. As perdas de potência ativa e a função objetivo do sistema reconfigurado são apresentadas na Tabela 35.

Tabela 35 - Resultados do sistema de 136 barras - reconfigurado

Configuração inicial (Ramos abertos)	FO (US\$/1000)
9, 35, 49, 51, 54, 90, 96, 106, 126, 135, 136, 138, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151 e 155	181,0311
Nível de carregamento (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas (kW)
Leve	70,12766
Normal	289,39710
Pesado	990,73300

Fonte: próprio autor

Após a reconfiguração com o algoritmo de Prim pode-se notar que a nova topologia apresentou redução nas perdas de potência ativa em todos os níveis de carregamento e houve a redução da FO. A barra e o menor nível de tensão em cada carregamento neste caso são apresentados na Tabela 36.

Tabela 36 - Barras com menor tensão - Prim (sistema de 136 barras)

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Normal		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
105	0,97636	105	0,95111	105	0,92964

Fonte: próprio autor

Na próxima etapa, após a seleção das 10 melhores barras, o sistema reconfigurado é submetido a uma heurística para alocação de bancos de capacitores, onde foi encontrada uma solução inicial de boa qualidade que tem os seus resultados apresentados na Tabela 37.

Tabela 37 - Proposta de Solução Inicial (Sistema de 136 Barras) - Reconfigurada e com Alocação de Capacitores

Configuração inicial (Ramos abertos)	FO (US\$/1000)
9, 35, 49, 51, 54, 90, 96, 106, 126, 135, 136, 138, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151 e 155	178,05890
Nível de carregamento (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas (kW)
Leve	68,21851
Normal	276,33370
Pesado	953,08170
Capacitores Fixos	Barra (nº de Bancos)
300 kVAr	105 (2), 119(1)
Capacitores Chaveados	Barra (nº de Bancos)
300 kVAr	-

Fonte: próprio autor

A barra e o menor nível de tensão em cada carregamento após o sistema ser submetido à heurística são apresentados na Tabela 38.

Tabela 38 - Barras com menor tensão - solução inicial (sistema de 84 barras)

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Normal		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
60	0,98458	60	0,96856	105	0,95083

Fonte: próprio autor

Com a Proposta de Solução Inicial obtida e utilizando a vizinhança apresentada anteriormente, considerando que a lista reduzida utilizada pela vizinhança contém 50 barras consideradas atrativas, que foram selecionadas da mesma forma que na heurística para alocação de bancos de capacitores, submete-se o sistema ao algoritmo Busca Tabu Reformulada. O sistema resultante reconfigurado com alocação de bancos de capacitores é mostrado na Tabela 39.

Tabela 39 - Resultados sistema de 136 barras - Solução Final

Configuração inicial (Ramos abertos)	FO (US\$/1000)
7, 38, 51, 54, 84, 90, 96, 106, 118, 126, 128, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 147, 148, 150 e 151	170,76610

Nível de carregamento (0,5; 1,0; 1,8)	Perdas (kW)
Leve	62,90418
Normal	256,53480
Pesado	894,02320
Capacitores Fixos	Barra (<i>n</i>^o de Bancos)
300 kVAr	31(3), 105(2), 107(2)
Capacitores Chaveados	Barra (<i>n</i>^o de Bancos)
300 kVAr	-

Fonte: próprio autor

A barra e o menor nível de tensão em cada carregamento da solução final são apresentados na Tabela 40.

Tabela 40 - Barras com menor tensão - solução final (sistema de 136 barras)

Barras com menor tensão					
Carregamento					
Leve		Normal		Pesado	
Barra	V(pu)	Barra	V(pu)	Barra	V(pu)
74	0,98669	74	0,97294	105	0,95778

Fonte: próprio autor

Diante dos resultados encontrados pela meta-heurística Busca Tabu Reformulada 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 com os capacitores o custo de operação do sistema reduziu em 15,30% comparado com o caso base. Em outras palavras, os custos de operação passam de 201,63 (US\$/1000) para 170,77 (US\$/1000) representando uma redução de 30,9 mil US\$ por ano. O teste para o sistema de 136 barras foi resolvido em 936,5 segundos.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se a aplicação de um algoritmo baseado na meta-heurística Busca Tabu, denominada de Busca Tabu Reformulada para otimizar a operação de um sistema de distribuição radial através de uma estratégia que, de forma simultânea, faz a reconfiguração e a alocação de bancos de capacitores. Dessa forma, pode-se diminuir os custos operacionais devido às perdas que compensa o custo da compra e instalação de bancos de capacitores e ainda gera um lucro para a empresa distribuidora. Adicionalmente, a estratégia de mudança da estrutura de operação do sistema de distribuição traz benefícios complementares tais como a melhoria do perfil de tensão, a redução das correntes nos ramos do sistema o que permite que o sistema trabalhe em melhores condições de operação, a melhoria de fator de potência na operação do sistema de distribuição, entre outras.

A meta-heurística busca tabu foi reformulada eliminando a necessidade de usar lista de atributos proibidos e o critério de aspiração. Essa estratégia é válida para o problema que está sendo resolvido em que avaliar a vizinhança de uma proposta de solução consome um tempo de processamento muito elevado (é necessário resolver muitos problemas de fluxo de carga radial) e a verificação completa de que uma nova proposta de solução que já foi visitada anteriormente pode ser feita com um tempo de processamento muito pequeno quando comparado com o tempo de processamento para resolver um problema de fluxo de carga.

Na estratégia de otimização foi incorporado o algoritmo de Prim que permite encontrar de forma simples e rápida uma proposta de solução inicial, isto é, uma topologia radial inicial de qualidade para iniciar o processo tabu search reformulado. Também foi incorporado um algoritmo de fluxo de carga radial que permite avaliar a qualidade de uma proposta de solução resolvendo três problemas de fluxo de carga. Através da solução de um problema de fluxo de carga radial também é possível verificar se a proposta de solução viola alguma restrição operacional de tensão ou de corrente.

O algoritmo Busca Tabu Reformulada mostrou-se capaz de gerar soluções de qualidade para os sistemas testados exigindo pouco tempo de processamento. Em todos os testes feitos foi possível observar a diminuição dos custos de operação do sistema e a diminuição das perdas de potência ativa nos três níveis de carregamento.

Adicionalmente, o processo de vizinhança utilizado mostrou-se eficaz e as listas utilizadas no algoritmo ajudaram tanto para evitar ciclagem, quanto para armazenar as melhores soluções encontradas, fazendo com que o algoritmo se torne mais rápido. Assim, para o sistema testado a proposta de otimização apresentou um bom desempenho.

Adicionalmente, pode ser conveniente incorporar novas estratégias no algoritmo busca tabu para resolver problemas de maior porte ou de maior complexidade. A alocação de bancos de capacitores gera uma vizinhança de cardinalidade muito elevada (existem muitas propostas de solução a serem analisadas e muitas delas podem não ser de boa qualidade). Dessa forma pode ser vantajoso desenvolver uma estratégia de redução de vizinhança.

REFERÊNCIAS

- BARAN, M. E.; WU, F. F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power delivery*, Piscataway, v. 4, n. 2, p. 1401–1407, 1989.
- BARAN, M. E.; WU, F. F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems. *IEEE Transactions on power Delivery*, Piscataway, v. 4, n. 1, p. 725–734, 1989.
- BORGES, M. C.; FRANCO, J. F.; RIDER, M. J. Optimal reconfiguration of electrical distribution systems using mathematical programming. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Heidelberg, v. 25, n. 1, p. 103–111, 2014.
- CARREÑO, E. M.; ROMERO, R.; PADILHA-FELTRIN, A. An efficient codification to solve distribution network reconfiguration for loss reduction problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 23, n. 4, p. 1542–1551, 2008.
- CHANG, C.-F. Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution systems by ant colony search algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 23, n. 4, p. 1747–1755, 2008.
- CHIANG, H.-D.; JEAN-JUMEAU, R. Optimal network reconfigurations in distribution systems. ii. solution algorithms and numerical results. *IEEE transactions on Power delivery*, Piscataway, v. 5, n. 3, p. 1568–1574, 1990.
- CHIOU, J.-P.; CHANG, C.-F.; SU, C.-T. Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 20, n. 2, p. 668–674, 2005.
- CIVANLAR, S.; GRAINGER, J.; YIN, H.; LEE, S. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 3, n. 3, p. 1217–1223, 1988.
- DURA, H. Optimum number, location, and size of shunt capacitors in radial distribution feeders a dynamic programming approach. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, n. 9, p. 1769–1774, 1968.
- 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*, Piscataway, v. 30, n. 2, p. 593–601, 2015.
- 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, 2012, San Diego. *Proceedings [...]*. Piscataway: IEEE, 2012. p. 1–8.

GENDREAU, M.; POTVIN, J.-Y. *Handbook of metaheuristics*. [S.l.]: New York: Springer, 2010.

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

GLOVER, F.; LAGUNA, M. *Tabu Search*. Norwell: Kluwer Academic, 1997. ISBN 079239965X.

GLOVER, F. W.; KOCHENBERGER, G. A. *Handbook of metaheuristics*. [S.l.]: Boston: Kluwer Academic, 2003.

GOMES, F. V.; CARNEIRO, S.; PEREIRA, J. L. R.; VINAGRE, M. P.; GARCIA, P. A. N.; ARAUJO, L. R. A new heuristic reconfiguration algorithm for large distribution systems. *IEEE Transactions on Power systems*, Piscataway, v. 20, n. 3, p. 1373–1378, 2005.

GOSWAMI, S. K.; BASU, S. K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 7, n. 3, p. 1484–1491, 1992.

GUIMARÃES, M.; CASTRO, C.; ROMERO, R. Distribution systems operation optimisation through reconfiguration and capacitor allocation by a dedicated genetic algorithm. *IET generation, transmission & distribution*, Stevenage, v. 4, n. 11, p. 1213–1222, 2010.

GUIMARÃES, M. A. d. N. *et al.* Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmos de busca tabu. [sn], 2005.

GUIMARÃES, M. A. d. N. *et al.* Plataforma integrada para o planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando metaheurísticas. [sn], 2009.

HARRIS, J. M.; HIRST, J. L.; MOSSINGHOFF, M. J. *Combinatorics and graph theory*. [S.l.]: Springer, 2008.

JABR, R. A.; SINGH, R.; PAL, B. C. Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming. *IEEE Transactions on Power systems*, IEEE, 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*, Piscataway, v. 11, n. 2, p. 890–897, 1996.

KALANTAR, M.; DASHTI, R. Combination of network reconfiguration and capacitor placement for loss reduction in distribution system with based genetic algorithm. In: INTERNATIONAL UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE, 41 st., 2006, Newcastle-upon-Tyne. *Proceedings [...]*. Piscataway, 2006. v. 1, p. 308–312.

LAVORATO, M.; FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; ROMERO, R. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 27, n. 1, p. 172–180, 2012.

LEE, R.; BROOKS, C. A method and its application to evaluate automated distribution control.

IEEE Transactions on Power Delivery, Piscataway, v. 3, n. 3, p. 1232–1240, 1988.

LEVITIN, G.; KALYUZHNY, A.; SHENKMAN, A.; CHERTKOV, M. Optimal capacitor allocation in distribution systems using a genetic algorithm and a fast energy loss computation technique. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 15, n. 2, p. 623–628, 2000.

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

MENDOZA, J.; LÓPEZ, R.; MORALES, D.; LÓPEZ, E.; DESSANTE, P.; MORAGA, R. Minimal loss reconfiguration using genetic algorithms with restricted population and addressed operators: real application. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 21, n. 2, p. 948–954, 2006.

MERLIN, A.; BACK, H. Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration for an urban power distribution system. In: POWER SYSTEMS COMP. COM., 1975, Cambridge. *Proceedings [...]*. [S.l.], 1975. v. 1, p. 1–18.

MOMOH, J.; CAVEN, A. C. Distribution system reconfiguration scheme using integer interior point programming technique. In: IEEE TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION, 2003, Dallas. *Proceedings [...]*. Piscataway: IEEE, 2003. v. 1, p. 234–241.

MONTICELLI, A. J. *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. [S.l.]: E. Blucher, 1983.

MONTSUTSUMI, M. M. Otimização simultânea da reconfiguração e da alocação de bancos de capacitores em sistema de distribuição radiais utilizando uma estratégia multipartida. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2017.

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

PAPADOPOULOS, M.; POLYSOS, P.; FACAROS, A.; MARIOLIS, K. Selection of the optimum size and location of capacitor banks on medium voltage networks. In: *CIGRE 1983*. [S.l.: s.n.], 1983.

PEPONIS, G.; PAPADOPULOS, M.; HATZIARGYRIOU, N. Optimal operation of distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 11, n. 1, p. 59–67, 1996.

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. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2015.

RIBEIRO, É. T. A. *Modelos de programação inteira mista para a alocação ótima de bancos de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica radiais*. 2013. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2013.

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

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

SOUZA, S. S. F. d. *Algoritmo GRASP especializado aplicado ao problema de reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição radial*. 2013. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2013.

TINNEY, W. F. Compensation methods for network solutions by optimally ordered triangular factorization. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, n. 1, p. 123–127, 1972.

VENKATESH, B.; RANJAN, R. Fuzzy ep algorithm and dynamic data structure for optimal capacitor allocation in radial distribution systems. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, Stevenage, v. 153, n. 1, p. 80–88, 2006.

ZENG, R.; PAN, X.; HE, J.; SHENG, X. Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution system. In: IEEE REGION 10 CONFERENCE ON COMPUTERS, COMMUNICATIONS, CONTROL AND POWER ENGINEERING - TENCOM '02, 2002, Beijing. *Proceedings [...]*. Piscataway: IEEE, 2002. v. 3, p. 1945–1949.

ZHANG, D.; FU, Z.; Y, D.; ZHANG, L. Capacitor switching and network reconfiguration for loss reduction in distribution system. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, 2006, Montreal. *Proceedings [...]*. Piscataway: IEEE, 2006. p. 1–6.

ZHANG, D.; FU, Z.; ZHANG, L. An improved ts algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems. *Electric Power Systems Research*, Amsterdam, v. 77, n. 5-6, p. 685–694, 2007.

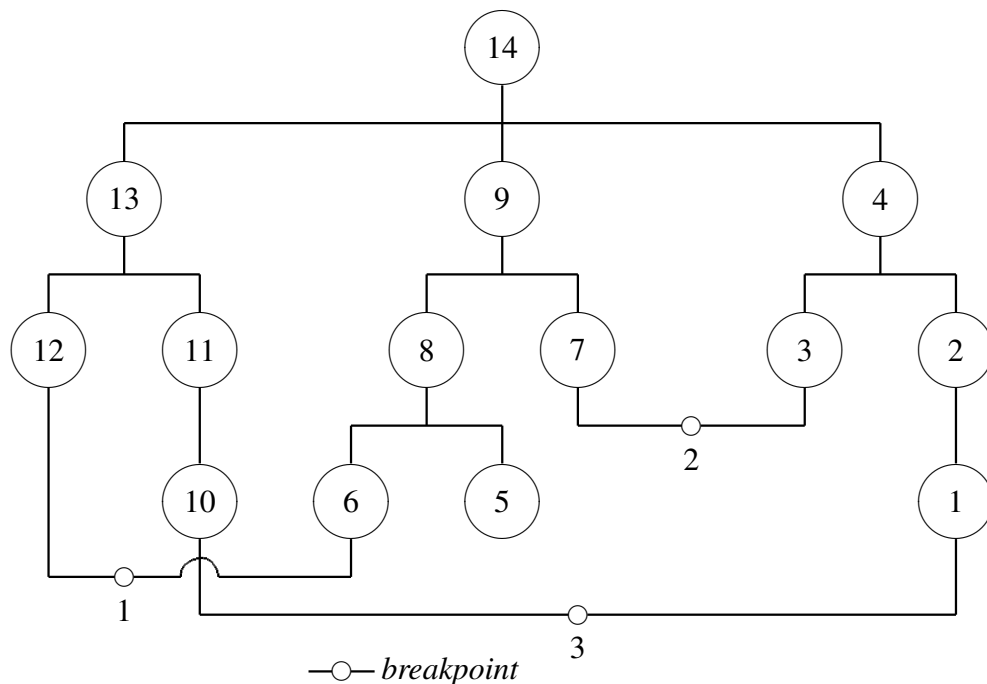
ZHANG, D.; FU, Z.; ZHANG, L. Joint optimization for power loss reduction in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 23, n. 1, p. 161–169, 2008.

ANEXO A - FLUXO DE CARGA PARA SISTEMAS FRACAMENTE MALHADOS

O algoritmo de FC para sistemas fracamente malhados é necessário para obter os FP ativa em cada ramo do sistema que são utilizados no algoritmo de Prim para geração de uma topologia radial inicial. Para resolver o FC é necessário conhecer a carga da barra, a impedância dos ramos e a potência do sistema.

A Figura 12 mostra um exemplo de rede de distribuição fracamente malhada, que contém três laços, mas não podemos aplicar diretamente o algoritmo de varredura em um sistema malhado, sendo necessário transformá-lo em um sistema radial. O primeiro passo para resolver um sistema fracamente malhado é transformá-lo em um sistema radial, fechando os ramos que formam malha, e transformando-os em nós fictícios chamados *breakpoints*.

Figura 11 - Sistema fracamente malhado



Fonte: Elaborado pelo autor.

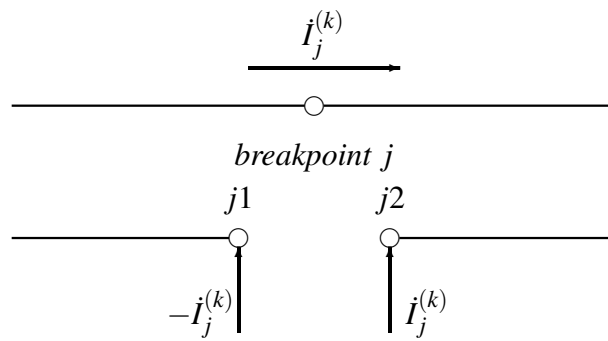
Ao aplicar o algoritmo de FC para redes radiais, na iteração k , em um *breakpoint* j , a corrente $\dot{I}_j^{(k)}$ injetada nos nós terminais $j1$ e $j2$ dos p *breakpoints* são mostradas em (44) e (45).

$$\dot{I}_{j1}^{(k)} = -\dot{I}_j^{(k)} \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (44)$$

$$\dot{I}_{j2}^{(k)} = \dot{I}_j^{(k)} \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (45)$$

Com o sistema radial resultante é possível aplicar o FC de sistema radial *backward/forward sweep* desenvolvido por (SHIRMOHAMMADI *et al.*, 1988). Na Figura 13 é mostrado um esquema do processo.

Figura 12 - Representação do *breakpoint* usando injeções de correntes nodais

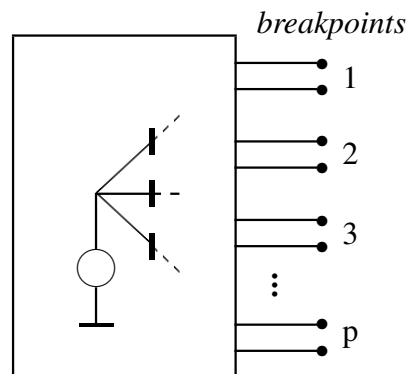


Fonte: Shirmohammadi *et al.* (1988).

A.1 CÁLCULO DAS CORRENTES NOS *BREAKPOINTS* - MÉTODO DE COMPENSAÇÃO

As correntes nos breakpoints são calculadas utilizando um método apresentado por Tinney (1972), chamado método de compensação multiporta. A Figura 14 ilustra o sistema radial resultante com a abertura dos *breakpoints* analisado como um circuito multiporta, em que as portas do circuito são formadas pelos nós dos *breakpoints*. Para que seja montado o circuito multiporta é necessário o cálculo das correntes nos *breakpoints*.

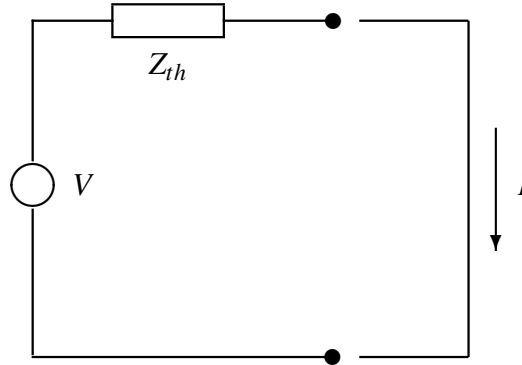
Figura 13 - Equivalente multiporta da rede visto pelos *breakpoints*



Fonte: Shirmohammadi *et al.* (1988).

O equivalente multiporta para uma rede linear é o circuito equivalente de Thévenin da rede radial vista pelos *breakpoints*, como na Figura 15. No circuito mostrado na Figura 15, a tensão de Thévenin V_{th} , é o vetor $[V]_{p \times 1}$, Z_{th} é a matriz $[Z_{th}]_{p \times p}$ de impedância vista pelos *breakpoints* e I é o vetor $[I]_{p \times 1}$ das correntes de *breakpoint* desejadas.

Figura 14 - Circuito equivalente de Thévenin da rede vista pelos *breakpoints*



Fonte: Shirmohammadi *et al.* (1988).

A impedância equivalente de Thévenin é definida como (46) e descreve o circuito da Figura 15.

$$V = Z_{th}I \quad (46)$$

A.2 CÁLCULO DA MATRIZ DE IMPEDÂNCIAS EQUIVALENTES VISTAS PELOS *BREAKPOINTS*

Utilizando a equação (46) na forma matricial, a matriz de impedância equivalente é obtida como no método descrito a seguir.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \vdots \\ \dot{V}_j \\ \vdots \\ \dot{V}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{11} & \dots & \bar{Z}_{1j} & \dots & \bar{Z}_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{Z}_{j1} & \dots & \bar{Z}_{jj} & \dots & \bar{Z}_{jp} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{Z}_{p1} & \dots & \bar{Z}_{pj} & \dots & \bar{Z}_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_j \\ \vdots \\ \dot{I}_p \end{bmatrix} \quad (47)$$

em que $\bar{Z}_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$

De acordo com (47), o vetor de tensões nos *breakpoints* para $\dot{I}_j = 1 + j0$ pu e $\dot{I}_i = 0$, $i = 1, 2, \dots, p$ e $i \neq j$ será igual a a coluna j da matriz de impedâncias, ou seja, a matriz de impedâncias vista pelos *breakpoints* será igual a matriz de tensão nos *breakpoints* em que corresponde a aplicar uma corrente de valor 1 pu no *breakpoint* j com polaridades opostas. Quando

não há cargas, a solução do FC para redes radiais pode ser obtida em uma única iteração. Cada uma das tensões nos *breakpoints* pode ser determinada subtraindo-se as tensões nos terminais de cada *breakpoint*. Este processo deve ser repetido, até que todas colunas da matriz de impedâncias vistas pelos *breakpoints* estejam completas (SHIRMOHAMMADI *et al.*, 1988).

A.3 PROCESSO ITERATIVO DE COMPENSAÇÃO

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

1. Montar a matriz de impedâncias equivalentes Z_{th} de Thévenin vistas pelos *breakpoints* da rede radial, mantendo-a constante durante o processo;
2. Calcular a tensão equivalente de Thévenin (vetor de tensões nos *breakpoints*, V) da rede radial através dos processos de *backward* e *forward*, incluindo as correntes nos *breakpoints* calculadas na iteração anterior do processo de compensação. O valor inicial das correntes nos *breakpoints* é zero;
3. Calcular a mudança incremental nas correntes dos *breakpoints* usando o circuito equivalente de Thévenin. Na iteração k , a mudança incremental das correntes nos *breakpoints* é dada por (48).

$$\Delta I^k = Z_{th}^{-1} V^k \quad (48)$$

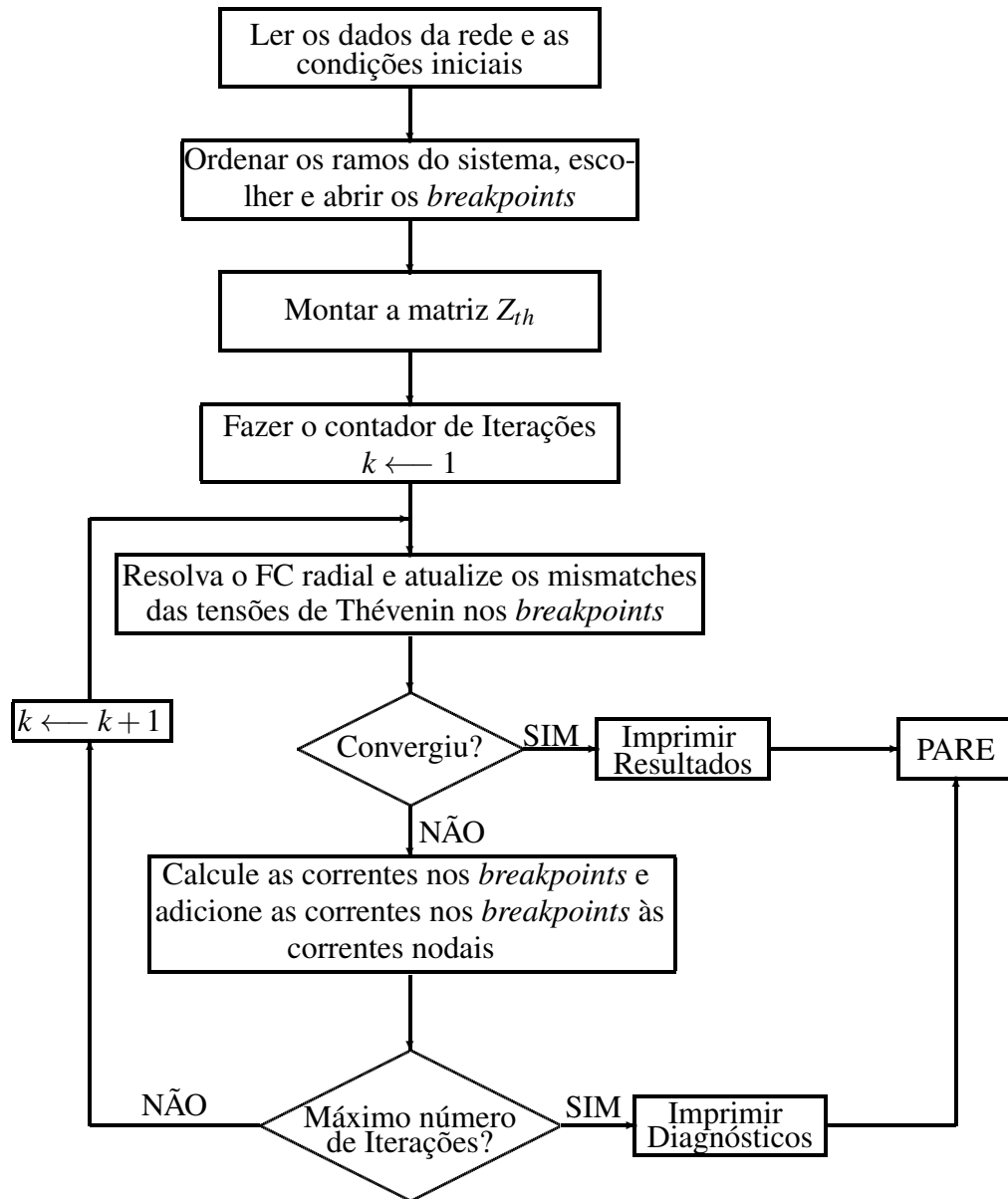
4. Atualizar as correntes nos *breakpoints*. Na iteração k , a atualização é dada por (49).

$$I^{(k)} = I^{(k-1)} + \Delta I^{(k)} \quad (49)$$

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

A Figura 16 mostra o fluxograma do método de cálculo do problema de fluxo de carga para redes fracamente malhadas.

Figura 15 - Fluxo de carga para redes fracamente malhadas



Fonte: Shirmohammadi *et al.* (1988).

ANEXO B - DADOS DOS SISTEMAS TESTADOS

B.1 SISTEMA DE 33 BARRAS

Barra ou nó de referência: 1 (Subestação)

Tensão base do sistema: 12,66 kV

Potência base: 1000 kVA

Tabela 41 - Dados do sistema de 33 barras

Dados de Ramos						Dados de Barras		
Ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Fluxo de potência ativa (kW)	Barra	Demanda Ativa (kW)	Demanda Reativa (kVAr)
1	1	2	0,0922	0,0470	3838,2908	1	0	0
2	2	3	0,4930	0,2511	2707,2281	2	100	60
3	3	4	0,3660	0,1864	1250,0327	3	90	40
4	4	5	0,3811	0,1941	1125,3030	4	120	80
5	5	6	0,8190	0,7070	1061,3271	5	60	30
6	6	7	0,1872	0,6188	441,6340	6	60	20
7	7	8	0,7114	0,2351	241,3765	7	200	100
8	8	9	1,0300	0,7400	362,0683	8	200	100
9	9	10	1,0440	0,7400	70,3654	9	60	20
10	10	11	0,1966	0,0650	10,3306	10	60	20
11	11	12	0,3744	0,1238	34,6712	11	45	30
12	12	13	1,4680	1,1550	220,5993	12	60	35
13	13	14	0,5416	0,7129	159,8200	13	60	35
14	14	15	0,5910	0,5260	39,6555	14	120	80
15	15	16	0,7463	0,5450	209,0737	15	60	10
16	16	17	1,2890	1,7210	148,5990	16	60	20
17	17	18	0,7320	0,5740	88,0417	17	60	20
18	2	19	0,1640	0,1565	1019,3075	18	90	40
19	19	20	1,5042	1,3554	927,6908	19	90	40
20	20	21	0,4095	0,4784	825,0575	20	90	40
21	21	22	0,7089	0,9373	408,8188	21	90	40
22	3	23	0,4512	0,3083	1336,6717	22	90	40
23	23	24	0,8980	0,7091	1239,3359	23	90	50
24	24	25	0,8960	0,7011	806,5686	24	420	200
25	6	26	0,2030	0,1034	552,0299	25	420	200
26	26	27	0,2842	0,1447	491,3839	26	60	25

27	27	28	1,0590	0,9337	430,6359	27	60	25
28	28	29	0,8042	0,7006	368,3709	28	60	20
29	29	30	0,5075	0,2585	626,5399	29	120	70
30	30	31	0,9744	0,9630	423,6499	30	200	600
31	31	32	0,3105	0,3619	272,4273	31	150	70
32	32	33	0,3410	0,5302	62,2692	32	210	100
33	8	21	2,0000	2,0000	320,9666	33	60	40
34	9	15	2,0000	2,0000	230,5653			
35	12	22	2,0000	2,0000	315,2824			
36	18	33	0,5000	0,5000	2,1632			
37	25	29	0,5000	0,5000	380,5663			

Fonte: Baran e Wu (1989a)

B.2 SISTEMA DE 70 BARRAS

Barra ou nó de referência: 1 (Subestação)

Tensão base do sistema: 12,66 kV

Potência base: 100.000 kVA

Tabela 42 - Dados do sistema de 70 barras

Dados de Ramos						Dados de Barras		
Ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Fluxo de potência ativa (kW)	Barra	Demanda Ativa (kW)	Demanda Reativa (kVAr)
1	1	2	0,0005	0,0012	3884,2800	1	0,00	0,00
2	2	3	0,0005	0,0012	3884,2090	2	0,00	0,00
3	3	4	0,0001	0,0001	3796,6053	3	0,00	0,00
4	4	5	0,0015	0,0036	2960,2355	4	0,00	0,00
5	5	6	0,0251	0,0294	1550,1888	5	0,00	0,00
6	6	7	0,3660	0,1864	1549,7621	6	0,00	0,00
7	7	8	0,3811	0,1941	1540,9394	7	2,60	2,20
8	8	9	0,0922	0,0470	1494,0852	8	40,40	30,00
9	9	10	0,0493	0,0251	1373,5127	9	75,00	54,00
10	10	11	0,8190	0,2707	568,3211	10	30,00	22,00
11	11	12	0,1872	0,0619	538,4815	11	28,00	19,00
12	12	13	0,7114	0,2351	559,4679	12	145,00	104,00
13	13	14	1,0300	0,3400	356,6573	13	145,00	104,00
14	14	15	1,0440	0,3450	40,9702	14	8,00	5,50
15	15	16	1,0580	0,3496	49,0652	15	8,00	5,50
16	16	17	0,1966	0,0650	387,9529	16	0,00	0,00
17	17	18	0,3744	0,1238	342,1806	17	45,50	30,00
18	18	19	0,0047	0,0016	281,7777	18	60,00	35,00

19	19	20	0,3276	0,1083	221,7738	19	60,00	35,0
20	20	21	0,2106	0,0696	221,6204	20	0,00	0,00
21	21	22	0,3416	0,1129	220,5218	21	1,00	0,60
22	22	23	0,0140	0,0046	494,3441	22	114,00	81,00
23	23	24	0,1591	0,0526	489,0131	23	5,30	3,50
24	24	25	0,3463	0,1145	488,6680	24	0,00	0,00
25	25	26	0,7488	0,2475	459,9170	25	28,00	20,00
26	26	27	0,3089	0,1021	458,4829	26	0,00	0,00
27	27	28	0,1732	0,0572	443,8886	27	14,00	10,00
28	3	29	0,0044	0,0108	87,5328	28	14,00	10,00
29	29	30	0,0640	0,1565	61,5324	29	26,00	18,60
30	30	31	0,3978	0,1315	35,5301	30	26,00	18,60
31	31	32	0,0702	0,0232	35,5250	31	0,00	0,00
32	32	33	0,3510	0,1160	35,5241	32	0,00	0,00
33	33	34	0,8390	0,2816	35,5196	33	0,00	0,00
34	34	35	1,7080	0,5646	21,5089	34	14,00	10,00
35	35	36	1,4740	0,4873	6,0005	35	15,50	14,00
36	4	37	0,0044	0,0108	836,3562	36	6,00	4,00
37	37	38	0,0640	0,1565	810,3208	37	26,00	18,55
38	38	39	0,1053	0,1230	783,8342	38	26,00	18,55
39	39	40	0,0304	0,0355	783,0789	39	0,00	0,00
40	40	41	0,0018	0,0021	758,8608	40	24,00	17,00
41	41	42	0,7283	0,8509	734,8486	41	24,00	17,00
42	42	43	0,3100	0,3623	728,9784	42	1,20	1,00
43	43	44	0,0410	0,0478	726,9966	43	0,00	0,00
44	44	45	0,0092	0,0116	518,0247	44	6,00	4,30
45	45	46	0,1089	0,1373	517,9983	45	0,00	0,00
46	46	47	0,0009	0,0012	478,4663	46	39,22	26,30
47	5	48	0,0034	0,0084	1409,9297	47	39,22	26,30
48	48	49	0,0851	0,2083	1409,8479	48	0,00	0,00
49	49	50	0,2898	0,7091	1328,8004	49	79,00	56,40
50	50	51	0,0822	0,2011	937,7942	50	384,70	274,50
51	9	52	0,0928	0,0473	44,1018	51	384,70	274,50
52	52	53	0,3319	0,1114	3,6000	52	40,50	28,30
53	10	54	0,1740	0,0886	774,5382	53	3,60	2,70
54	54	55	0,2030	0,1034	769,4548	54	4,35	3,50
55	55	56	0,2842	0,1447	742,2101	55	26,40	19,00
56	56	57	0,2813	0,1433	717,1178	56	24,0	17,2
57	57	58	1,5900	0,5337	716,1102	57	0,00	0,00
58	58	59	0,7837	0,2630	710,4235	58	0,00	0,00
59	59	60	0,3042	0,1006	707,6205	59	0,00	0,00
60	60	61	0,3861	0,1172	1147,7506	60	100,00	72,00
61	61	62	0,5075	0,2555	1142,5027	61	0,00	0,00
62	62	63	0,9740	0,0496	108,3954	62	1244,00	888,00
63	63	64	0,1450	0,0738	140,4805	63	32,00	23,00
64	64	65	0,7105	0,3619	140,5030	64	0,00	0,00
65	65	66	1,0410	0,5302	367,6134	65	227,00	162,00

66	12	67	0,2012	0,0611	36,0026	66	59,00	42,00
67	67	68	0,0047	0,0014	18,0000	67	18,00	13,00
68	13	69	0,7394	0,2444	56,0227	68	18,00	13,00
69	69	70	0,0047	0,0016	28,0000	69	28,00	20,00
70	12	44	0,5000	0,5000	202,3648	70	28,00	20,00
71	14	22	0,5000	0,5000	388,6593			
72	16	47	1,0000	1,0000	437,1280			
73	51	60	2,0000	2,0000	552,0930			
74	28	66	1,0000	1,0000	429,5772			

Fonte: Guimarães *et al.* (2009)

B.3 SISTEMA DE 84 BARRAS

Barra ou nó de referência: 1 (Subestação)

Tensão base do sistema: 11,40 kV

Potência base: 100.000 kVA

Tabela 43 - Dados do sistema de 84 barras

Dados de Ramos						Dados de Barras		
Ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Fluxo de potência ativa (kW)	Barra	Demanda Ativa (kW)	Demanda Reativa (kVAr)
1	1	84	0,1944	0,6624	2883,9406	1	0,0	0,0
2	1	2	0,2096	0,4304	2883,9406	2	100,0	50,0
3	2	3	0,2358	0,4842	2745,8950	3	300,0	200,0
4	3	4	0,0917	0,1883	2356,9794	4	350,0	250,0
5	4	5	0,2096	0,4304	1918,6956	5	220,0	100,0
6	5	6	0,0393	0,0807	1632,4874	6	1100,0	800,0
7	6	7	0,0405	0,1380	275,1565	7	400,0	320,0
8	7	8	0,1048	0,2152	360,7809	8	300,0	200,0
9	7	9	0,2358	0,4842	378,6010	9	300,0	230,0
10	7	10	0,1048	0,2152	397,2804	10	300,0	260,0
11	11	84	0,0786	0,1614	3844,9192	11	0,9	0,0
12	11	12	0,3406	0,6944	4203,2090	12	1200,0	800,0
13	12	13	0,0262	0,0538	602,0557	13	800,0	600,0
14	12	14	0,0786	0,1614	899,7665	14	700,0	500,0
15	15	84	0,1134	0,3864	3758,9827	15	0,0	0,0
16	15	16	0,0524	0,1076	3758,9827	16	300,0	150,0
17	16	17	0,0524	0,1076	4995,8728	17	500,0	350,0
18	17	18	0,1572	0,3228	4364,8729	18	700,0	400,0
19	18	19	0,0393	0,0807	3553,4174	19	1200,0	1000,0
20	19	20	0,1703	0,3497	1989,6968	20	300,0	300,0

21	20	21	0,2358	0,4842	681,9506	21	400,0	350,0
22	21	22	0,1572	0,3228	53,8581	22	50,0	20,0
23	21	23	0,1965	0,4035	104,4350	23	50,0	20,0
24	23	24	0,1310	0,2690	50,9941	24	50,0	10,0
25	25	84	0,0567	0,1932	3747,3965	25	50,0	30,0
26	25	26	0,1048	0,2152	3689,2650	26	100,0	60,0
27	26	27	0,2489	0,5111	1974,3608	27	100,0	70,0
28	27	28	0,0486	0,1656	1836,9830	28	1800,0	1300,0
29	28	29	0,1310	0,2690	469,8607	29	200,0	120,0
30	30	84	0,1965	0,3960	3526,1285	30	0,0	0,0
31	30	31	0,1310	0,2690	3526,1285	31	1800,0	1600,0
32	31	32	0,1310	0,2690	1126,2673	32	200,0	150,0
33	32	33	0,0262	0,0538	35,5310	33	200,0	100,0
34	33	34	0,1703	0,3497	235,4787	34	800,0	600,0
35	34	35	0,0524	0,1076	400,0365	35	100,0	60,0
36	35	36	0,4978	1,0222	283,3027	36	100,0	60,0
37	36	37	0,0393	0,0807	166,0948	37	20,0	10,0
38	37	38	0,0393	0,0807	143,8637	38	20,0	10,0
39	38	39	0,0786	0,1614	97,9787	39	20,0	10,0
40	39	40	0,2096	0,4304	116,8551	40	20,0	10,0
41	38	41	0,1965	0,4035	219,4362	41	200,0	160,0
42	41	42	0,2096	0,4304	37,2982	42	50,0	30,0
43	43	84	0,0486	0,1656	3385,8085	43	0,0	0,0
44	43	44	0,0393	0,0807	3019,1841	44	30,0	20,0
45	44	45	0,1310	0,2690	2977,5315	45	800,0	700,0
46	45	46	0,2358	0,4842	1899,0305	46	200,0	150,0
47	47	84	0,2430	0,8280	3891,2978	47	0,0	0,0
48	47	48	0,0655	0,1345	3891,2978	48	0,0	0,0
49	48	49	0,0655	0,1345	3875,2124	49	0,0	0,0
50	49	50	0,0393	0,0807	3859,1458	50	200,0	160,0
51	50	51	0,0786	0,1614	3593,7006	51	800,0	600,0
52	51	52	0,0393	0,0807	2577,3057	52	500,0	300,0
53	52	53	0,0786	0,1614	1991,8016	53	500,0	350,0
54	53	54	0,0524	0,1076	754,1594	54	500,0	300,0
55	54	55	0,1310	0,2690	174,9218	55	200,0	80,0
56	56	84	0,2268	0,7728	2623,7786	56	0,0	0,0
57	56	57	0,5371	1,1029	2623,7786	57	30,0	20,0
58	57	58	0,0524	0,1076	2529,4141	58	600,0	420,0
59	58	59	0,0405	0,1380	1791,5386	59	0,0	0,0
60	59	60	0,0393	0,0807	1788,5739	60	20,0	10,0
61	60	61	0,0262	0,0538	385,8136	61	20,0	10,0
62	61	62	0,1048	0,2152	363,4054	62	200,0	130,0
63	62	63	0,2358	0,4842	126,7493	63	300,0	240,0
64	63	64	0,0243	0,0828	267,1426	64	300,0	200,0
65	65	84	0,0486	0,1656	2249,1487	65	0,0	0,0
66	65	66	0,1703	0,3497	2249,1487	66	50,0	30,0
67	66	67	0,1215	0,4140	2177,7501	67	0,0	0,0

68	67	68	0,2187	0,7452	2164,2209	68	400,0	360,0
69	68	69	0,0486	0,1656	1601,9883	69	0,0	0,0
70	69	70	0,0729	0,2484	1598,9888	70	0,0	0,0
71	70	71	0,0567	0,1932	1594,4954	71	2000,0	1500,0
72	71	72	0,0262	0,0528	915,5951	72	200,0	150,0
73	73	84	0,3240	1,1040	2301,7304	73	0,0	0,0
74	73	74	0,0324	0,1104	2301,7304	74	0,0	0,0
75	74	75	0,0567	0,1932	2297,6938	75	1200,0	950,0
76	75	76	0,0486	0,1656	761,3632	76	300,0	180,0
77	77	84	0,2511	0,8556	3592,0668	77	0,0	0,0
78	77	78	0,1296	0,4416	3592,0668	78	400,0	360,0
79	78	79	0,0486	0,1656	3016,3137	79	2000,0	1300,0
80	79	80	0,1310	0,2640	654,0549	80	200,0	140,0
81	80	81	0,1310	0,2640	429,1470	81	500,0	360,0
82	81	82	0,0917	0,1883	315,3357	82	100,0	30,0
83	82	83	0,3144	0,6456	414,3260	83	400,0	360,0
84	5	55	0,1310	0,2690	89,5600	84	0,0	0,0
85	7	60	0,1310	0,2690	1376,9520			
86	11	43	0,1310	0,2690	370,6154			
87	12	72	0,3406	0,6994	1172,4528			
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	1596,2419			
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	1634,5169			
95	40	42	0,1965	0,4035	94,7592			
96	53	64	0,0393	0,0807	623,6547			

Fonte: Chiou, Chang e Su (2005)

B.4 SISTEMA DE 136 BARRAS

Barra ou nó de referência: 136

Tensão base do sistema: 13,80 kV

Potência base: 100.000 kVA

Tabela 44 - Dados do sistema de 136 barras

Dados de Ramos						Dados de Barras		
Ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	Fluxo de potência ativa (kW)	Barra	Demanda Ativa (kW)	Demanda Reativa (kVAr)

1	136	1	0,33205	0,76653	2445,3955	1	0,0	0,0
2	1	2	0,00188	0,00433	2432,7431	2	47,780	19,009
3	2	3	0,22324	0,51535	2384,8914	3	42,551	16,929
4	3	4	0,09943	0,22953	2334,1583	4	87,022	34,622
5	4	5	0,15571	0,35945	2243,6190	5	311,310	123,855
6	5	6	0,16321	0,37677	1927,1974	6	148,869	59,228
7	6	7	0,11444	0,26417	381,9530	7	238,672	94,956
8	6	8	0,05675	0,05666	1392,3828	8	62,299	24,786
9	8	9	0,52124	0,27418	23,0525	9	124,598	49,571
10	8	10	0,10877	0,10860	1352,3791	10	140,175	55,768
11	10	11	0,39803	0,20937	116,8479	11	116,813	46,474
12	10	12	0,91744	0,31469	249,5694	12	249,203	99,145
13	10	13	0,11823	0,11805	844,4486	13	291,447	115,952
14	13	14	0,50228	0,26421	304,0182	14	303,720	120,835
15	13	15	0,05675	0,05666	248,3967	15	215,396	85,695
16	15	16	0,29379	0,15454	198,6605	16	198,586	79,007
17	136	17	0,33205	0,76653	2670,3791	17	0,0	0,0
18	17	18	0,00188	0,00433	2655,1269	18	0,0	0,0
19	18	19	0,22324	0,51535	2655,0406	19	0,0	0,0
20	19	20	0,10881	0,25118	2644,7864	20	30,127	14,729
21	20	21	0,71078	0,37388	231,2292	21	230,972	112,920
22	20	22	0,18197	0,42008	2378,4322	22	60,256	29,458
23	22	23	0,30326	0,15952	231,0826	23	230,972	112,920
24	22	24	0,02439	0,05630	2080,3272	24	120,507	58,915
25	24	25	0,04502	0,10394	1811,4376	25	0,0	0,0
26	25	26	0,01876	0,04331	1175,5257	26	56,981	27,857
27	26	27	0,11823	0,11805	1118,3603	27	364,665	178,281
28	27	28	0,02365	0,02361	752,6411	28	0,0	0,0
29	28	29	0,18954	0,09970	181,6799	29	124,647	60,939
30	29	30	0,39803	0,20937	56,9899	30	56,981	27,857
31	28	31	0,05675	0,05666	570,8637	31	0,0	0,0
32	31	32	0,09477	0,04985	482,9366	32	85,473	41,787
33	32	33	0,41699	0,21934	397,3116	33	0,0	0,0
34	33	34	0,11372	0,05982	396,8586	34	396,735	193,960
35	31	35	0,07566	0,07555	87,7897	35	0,0	0,0
36	35	36	0,36960	0,19442	423,8883	36	181,152	88,563
37	36	37	0,26536	0,13958	242,2794	37	242,172	118,395
38	35	38	0,05675	0,05666	336,1054	38	75,316	36,821
39	136	39	0,33205	0,76653	3127,4050	39	0,0	0,0
40	39	40	0,11819	0,27283	3106,6665	40	1,254	0,531
41	40	41	2,96288	1,01628	6,2747	41	6,274	2,660
42	40	42	0,00188	0,00433	3091,7561	42	0,0	0,0
43	42	43	0,06941	0,16024	3091,6393	43	117,880	49,971
44	43	44	0,81502	0,42872	62,6886	44	62,668	26,566
45	43	45	0,06378	0,14724	2906,7565	45	172,285	73,034
46	45	46	0,13132	0,30315	2730,9539	46	458,556	194,388

47	46	47	0,06191	0,14291	2265,9831	47	262,962	111,473
48	47	48	0,11444	0,26417	430,9057	48	235,761	99,942
49	48	49	0,28374	0,28331	39,6214	49	0,0	0,0
50	49	50	0,28374	0,28331	39,6176	50	109,215	46,298
51	48	51	0,04502	0,10394	155,3437	51	0,0	0,0
52	51	52	0,02626	0,06063	790,1384	52	72,809	30,865
53	52	53	0,06003	0,13858	231,5757	53	258,473	109,570
54	53	54	0,03002	0,06929	26,9233	54	69,169	29,322
55	54	55	0,02064	0,04764	96,0978	55	21,843	9,260
56	52	56	0,10881	0,25118	485,6404	56	0,0	0,0
57	56	57	0,25588	0,13460	485,4727	57	20,527	8,702
58	57	58	0,41699	0,21934	464,5512	58	150,548	63,819
59	58	59	0,50228	0,26421	313,4137	59	220,687	93,552
60	59	60	0,33170	0,17448	92,4026	60	92,384	39,163
61	60	61	0,20849	0,10967	0,0000	61	0,0	0,0
62	47	62	0,13882	0,32047	246,5351	62	226,693	96,098
63	136	63	0,00750	0,01732	2060,0647	63	0,0	0,0
64	63	64	0,27014	0,62362	2059,8643	64	294,016	116,974
65	64	65	0,38270	0,88346	1758,6292	65	83,015	33,028
66	65	66	0,33018	0,76220	1668,0683	66	83,015	33,028
67	66	67	0,32830	0,75787	949,3133	67	103,770	41,285
68	67	68	0,17072	0,39409	843,5978	68	176,408	70,184
69	68	69	0,55914	0,29412	83,0396	69	83,015	33,028
70	68	70	0,05816	0,13425	583,3442	70	217,917	86,698
71	70	71	0,70130	0,36890	28,3728	71	23,294	9,267
72	71	72	1,02352	0,53839	5,0752	72	5,075	2,019
73	70	73	0,06754	0,15591	336,9204	73	72,638	28,899
74	73	74	1,32352	0,45397	407,3947	74	405,990	161,5235
75	136	75	0,01126	0,02598	1720,4775	75	0,0	0,0
76	75	76	0,72976	1,68464	1720,2685	76	100,182	42,468
77	76	77	0,22512	0,51968	1226,5217	77	142,523	60,417
78	77	78	0,20824	0,48071	1305,9927	78	96,042	40,713
79	78	79	0,04690	0,10827	1207,6687	79	300,454	127,366
80	79	80	0,61950	0,61857	1080,0488	80	141,238	59,873
81	80	81	0,34049	0,33998	934,6108	81	279,847	118,631
82	81	82	0,56862	0,29911	87,3404	82	87,312	37,013
83	81	83	0,10877	0,10860	565,7018	83	243,849	103,371
84	83	84	0,56862	0,29911	155,9452	84	247,750	105,025
85	136	85	0,01126	0,02598	2514,4876	85	0,0	0,0
86	85	86	0,41835	0,96575	2514,0402	86	89,878	38,101
87	86	87	0,10499	0,13641	1138,1425	87	1137,28	482,108
88	86	88	0,43898	1,01338	1269,3993	88	458,339	194,296
89	88	89	0,07520	0,02579	806,5350	89	385,197	163,290
90	89	90	0,07692	0,17756	421,0220	90	0,0	0,0
91	90	91	0,33205	0,76653	1368,1955	91	79,608	33,747
92	91	92	0,08442	0,19488	518,2217	92	87,312	37,013
93	92	93	0,13320	0,30748	798,3930	93	0,0	0,0

94	93	94	0,29320	0,29276	345,3116	94	74,001	31,370
95	94	95	0,21753	0,21721	271,1014	95	232,050	98,369
96	95	96	0,26482	0,26443	38,9574	96	141,819	60,119
97	93	97	0,10318	0,23819	452,4962	97	0,0	0,0
98	97	98	0,13507	0,31181	452,3286	98	76,449	32,408
99	136	99	0,00938	0,02165	2194,5864	99	0,0	0,0
100	99	100	0,16884	0,38976	2194,2991	100	51,322	21,756
101	100	101	0,11819	0,27283	2137,8048	101	59,874	25,381
102	101	102	2,28608	0,78414	9,0662	102	9,065	3,843
103	101	103	0,45587	1,05236	2065,4098	103	2,092	0,887
104	103	104	0,69600	1,60669	855,9699	104	16,735	7,094
105	104	105	0,45774	1,05669	1356,7830	105	1506,522	638,634
106	105	106	0,20298	0,26373	155,6768	106	313,023	132,694
107	106	107	0,21348	0,27737	468,7320	107	79,831	33,842
108	107	108	0,54967	0,28914	460,1163	108	51,322	21,756
109	108	109	0,54019	0,28415	250,8302	109	0,0	0,0
110	107	110	0,04550	0,05911	1008,9449	110	202,435	85,815
111	110	111	0,47385	0,24926	106,4882	111	60,823	25,784
112	111	112	0,86241	0,45364	45,6298	112	45,618	19,338
113	112	113	0,56862	0,29911	0,0000	113	0,0	0,0
114	108	114	0,77711	0,40878	157,1970	114	157,070	66,584
115	114	115	1,08038	0,56830	0,0000	115	0,0	0,0
116	109	116	1,09933	0,57827	250,6055	116	250,148	106,041
117	116	117	0,47385	0,24926	0,0000	117	0,0	0,0
118	104	118	0,32267	0,74488	316,0183	118	69,809	29,593
119	118	119	0,14633	0,33779	246,0011	119	32,072	13,596
120	119	120	0,12382	0,28583	213,8720	120	61,084	25,894
121	136	121	0,01126	0,02598	1852,8592	121	0,0	0,0
122	121	122	0,64910	1,49842	1852,6119	122	94,622	46,260
123	122	123	0,04502	0,10394	1743,7358	123	49,858	24,375
124	123	124	0,52640	0,18056	123,2175	124	123,164	60,214
125	123	125	0,02064	0,04764	1569,7722	125	78,350	38,304
126	125	126	0,53071	0,27917	234,2521	126	145,475	71,121
127	125	127	0,09755	0,22520	1725,3450	127	21,369	10,447
128	127	128	0,11819	0,27283	299,1212	128	74,789	36,564
129	127	129	0,13882	0,32047	1403,0467	129	227,926	111,431
130	129	130	0,04315	0,09961	1420,2405	130	35,614	17,411
131	130	131	0,09192	0,21220	1384,0810	131	249,295	121,877
132	131	132	0,16134	0,37244	1589,8722	132	316,722	154,842
133	132	133	0,37832	0,37775	831,4085	133	333,817	163,199
134	133	134	0,39724	0,39664	495,9717	134	249,295	121,877
135	134	135	0,29320	0,29276	246,0994	135	0,0	0,0
136	7	73	0,13132	0,30315	143,1818	136	0,0	0,0
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	1194,1599
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	1318,1517
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)