

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS

**Multi-Chaveamento para Restauração de Serviço e
Balanceamento de Carga em Sistemas de Distribuição de
Energia Elétrica**

Alana da Silva Magalhães

Orientador: *Prof. Dr. Paulo Morelato França*

Co-Orientador: *Prof. Dr. Vinícius Jacques Garcia*

Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação.

Outubro/2007

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS

**Multi-Chaveamento para Restauração de Serviço e
Balanceamento de Carga em Sistemas de Distribuição de
Energia Elétrica**

Alana da Silva Magalhães

Orientador: *Prof. Dr. Paulo Morelato França*

Co-Orientador: *Prof. Dr. Vinícius Jacques Garcia*

Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Morelato França - FEEC / UNICAMP

Prof. Dr. Vinícius Jacques Garcia - UFSM / UNIPAMPA

Prof. Dr. Marco Antonio Freitas do Egito Coelho - UNB

Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva - FEEC / UNICAMP

Prof. Dr. Secundino Soares Filho - FEEC / UNICAMP

UNICAMP - Campinas - SP

Outubro/2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

M270m	<p>Magalhães, Alana da Silva</p> <p>Multi-chaveamento para restauração de serviço e balanceamento de carga em sistemas de distribuição de energia elétrica. / Alana da Silva Magalhães. – Campinas, SP: [s.n.], 2007.</p> <p>Orientador: Paulo Morelato França, Vinícius Jacques Garcia.</p> <p>Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.</p> <p>1. Otimização combinatória. 2. Sistemas de energia elétrica Distribuição de carga. 3. Transferência de Carga. 4. Troca de carga. I. França, Paulo Morelato. II. Garcia, Vinícius Jacques. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.</p>
-------	--

Título em Inglês:	Multi-Tier for service restoration and load balancing in electric distribution systems
Palavras-chave em Inglês:	Combinatorial optimization, Electric distribution systems, Load Balancing, Service restoration, Multi-Tier
Área de concentração:	Automação
Titulação:	Mestre em Engenharia Elétrica
Banca Examinadora:	Marco Antonio Freitas do Egito Coelho, Luiz Carlos Pereira da Silva
Data da defesa:	01/10/2007
Programa de Pós-Graduação:	Engenharia Elétrica

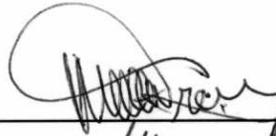
COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidata: Alana da Silva Magalhães

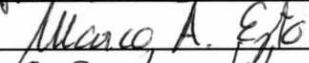
Data da Defesa: 1 de outubro de 2007

Título da Tese: "Multi-Chaveamento para Restauração de Serviço e Balanceamento de Carga em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica"

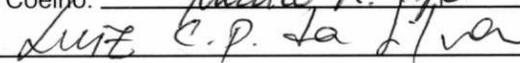
Prof. Dr. Paulo Morelato França (Presidente):



Prof. Dr. Marco Antonio Freitas do Egito Coelho:



Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva:



Resumo

Sistemas de distribuição de energia elétrica podem ser reconfigurados em sua topologia visando operações de manutenção, reenergização de áreas escuras causadas por temporais ou balanceamento da carga dos alimentadores. Este trabalho considera o problema de reconfiguração da rede com o objetivo de balancear a carga dos alimentadores sem deixar de observar as restrições de capacidade dos alimentadores, de queda de tensão nas barras de carga e de radiação da rede. Considera-se também um caso particular no qual há a necessidade de transferir carga de um determinado alimentador para os seus adjacentes por questões operativas, a fim de facilitar uma eventual manutenção ou visando a restauração de áreas desenergizadas. Depois da definição matemática do problema e da revisão da literatura especializada, são descritos sete algoritmos baseados em um método de balanceamento de carga conhecido como “*Distance Measurement Technique (DMT)*” aplicado a várias técnicas, inclusive a técnica de multichaveamento, usadas para determinar as operações de chaveamento envolvidas. Por fim, por meio de estudos com redes reais de médio e grande porte avalia-se a aplicabilidade das abordagens propostas.

Palavras-chave: Otimização Combinatória. Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Balanceamento de Carga. Restauração de Serviço. Multi-Chaveamento.

Abstract

Electric energy distribution systems can be reconfigured aiming at maintenance operations, reenergizing dark areas caused by storms or feeder load balancing. This work considers the network reconfiguration problem with the load balancing objective while respecting constraints like feeder and voltage limits as well as the maintenance of a radial structure. It is also considered the particular case in which one wants to transfer load from a given feeder to its adjacent ones caused by maintenance operations or service restoration. After defining the mathematical formulation proposed and presenting the bibliographical survey, seven algorithms are presented based on a method for load balancing known as *Distance Measurement Technique (DMT)* applied to several technique, also the multitier technique, used to determine the switching operations involved. Finally, the effectiveness of these proposed methods are proved in a set of four systems, two of them referring to real Brazilian systems.

Keywords: Combinatorial Optimization. Electric Distribution Systems. Load Balancing. Service Restoration. Multi-Tier.

Este trabalho teve o apoio da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

É com muito orgulho que dedico esta dissertação ao meu pai (*in memoriam*), à minha mãe e ao meu esposo Alan. Eu amo vocês.

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus por ter guiado e iluminado os meus passos e a Nossa Senhora Aparecida pela proteção e bênçãos.

Ao meu orientador, Paulo Morelato França, pela orientação, pelo apoio, pela amizade e por ter me concedido esta oportunidade.

Ao Vinícius pela co-orientação, amizade, apoio e pelas valiosas discussões.

Agradeço a todos que me deram apoio para a realização deste trabalho, em especial:

- ao meu esposo Alan pelo amor, carinho, compreensão, confiança e apoio que me deram forças nos momentos mais difíceis;
- à minha mãezinha pelas orações, amor e estímulo;
- à minha irmã Angela e meu irmão-cunhado Rezio pelo apoio, consolo e amor;
- à minha irmã Aline, companheira de longa caminhada, por me ajudar a superar a saudade e as dificuldades;
- à minha querida vovózinha Lázara, ao meu avô Marcílio, à minha madrinha Kátia, ao meu padrinho Antônio e à minha sogra-amiga Marilene por ter me amparado nos momentos de fraqueza;
- à minha família, pelo carinho e solidariedade;
- aos colegas do laboratório de Redes de Distribuição: José, Leonardo, Daniela, Martha, Celso e Vinícius pela ótima convivência;

- aos colegas do DENSIS que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento da tese;
- aos novos amigos: Thiago, Alex, Maíra, Daniela, Paulo, Patrícia, Gustavo, Adriana, Luciana, Aninha, Maria e Quito;
- à Márcia, Mazé e Noêmia por toda compreensão e auxílio;
- ao casal Luiz Carlos e Roberta pelo apoio em Campinas.

Sumário

Lista de Figuras	xxiii
Lista de Tabelas	xxvi
Lista de Abreviações	xxvi
1 Introdução	1
1.1 Sistemas de Energia Elétrica	3
1.1.1 Sistema de Distribuição	4
1.1.2 Topologias do Sistema de Distribuição	5
1.1.3 Estados do Sistema de Distribuição	6
1.1.4 Reconfiguração de Rede	7
1.2 Revisão Bibliográfica	9
1.2.1 Balanceamento de Cargas	9
1.2.2 Restauração do Serviço	12
2 Formulação do problema	17
2.1 Representação da Rede de Distribuição	17
2.2 Fluxo de Potência em Redes de Distribuição	19
2.3 Formulação Matemática do Problema	21
3 Modelagem Computacional	27
3.1 Aspectos da Implementação da Estrutura de Classes	27
3.1.1 Módulo Instância	29
3.1.2 Módulo Solução	29
3.1.3 Módulo Algoritmo	30

3.2	Aspectos da Implementação de Estruturas de Dados	30
3.2.1	Estrutura de dados para a Instância	31
3.2.2	Estrutura de dados para a Solução	33
4	Algoritmos Propostos para Transferência de Carga	35
4.1	Otimização Combinatória	35
4.1.1	Algoritmo Guloso	37
4.2	Índice de Classificação de Chaves	38
4.3	Técnica de Medida da Distância	38
4.4	Multi-Chaveamento	41
4.5	Algoritmos Desenvolvidos	42
4.5.1	Algoritmo de Balanceamento de Carga Irrestrito (ABCI)	44
4.5.2	Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito (ABCR)	45
4.5.3	Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito com Fronteira (ABCRF)	46
4.5.4	Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado (ABCRM)	47
4.5.5	Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado com Fronteira (ABCRMF)	48
4.5.6	Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado <i>Multi-Tier</i> (ABCRMMT)	49
4.5.7	Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado <i>Multi-Tier</i> com Fronteira (ABCRMMTF)	51
5	Resultados Computacionais	53
5.1	Resultados para o Algoritmo de Balanceamento de Carga Irrestrito	59
5.2	Resultado para o Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito	60
5.3	Resultado para o Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito com Fronteira	61
5.4	Resultados para o Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado	64
5.5	Resultado para o Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado com Fronteira	69
5.6	Resultado para o Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado <i>Multi-Tier</i>	74

5.7	Resultado para o Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado <i>Multi-Tier</i> com Fronteira	80
5.8	Análise das Redes	86
6	Conclusão e Trabalhos Futuros	87
	Referências bibliográficas	89
A	Modelagem Computacional - Estrutura de Classes	95
A.1	Módulo Entrada e Saída	95
A.2	Módulo Estrutura de Dados Auxiliares	96
A.3	Módulo Instância	97
A.4	Módulo Solução	98
A.5	Módulo Algoritmo	98
B	MULTI-CHAVEAMENTO PARA RESTAURAÇÃO DE SERVIÇO E BALANCEAMENTO DE CARGA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	101
B.1	Introdução	103
B.1.1	Balanceamento de Carga	104
B.1.2	Restauração de Serviço	105
B.2	Formulação Matemática do Problema	107
B.3	Fluxo de Potência em Redes de Distribuição	109
B.4	Índice de Classificação de Chaves e Multi-Chaveamento	109
B.4.1	Índice de Classificação de Chaves	109
B.4.2	Multi-Chaveamento	110
B.5	<i>Distance Measurement Technique</i> (DMT)	112
B.5.1	Determinação do ciclo com Máximo Balanceamento de Carga	113
B.5.2	Determinação da opção de chaveamento para o balanceamento de carga	114
B.6	Algoritmo Proposto	114
B.7	Resultados	116
B.8	Conclusões	119
B.9	Referências	120

Lista de Figuras

1.1	Sistema de Energia Elétrica.	3
1.2	Sistema de Distribuição.	5
1.3	Topologia Radial.	5
1.4	Topologia malhada.	6
1.5	Rede em operação normal.	7
1.6	Rede reconfigurada.	7
2.1	Rede de Distribuição Primária.	17
2.2	Exemplo de Grafo.	18
2.3	Grafo da Rede de Distribuição Primária da Figura 2.1.	19
2.4	Árvore da Rede de Distribuição Primária da Figura 2.1.	19
2.5	Diagrama de uma Rede de Distribuição.	20
3.1	Diagrama de Classe do Sistema Desenvolvido.	28
3.2	Modelo de grafo para rede de distribuição.	31
3.3	Matriz adjacência vértice-vértice para o grafo da Figura 3.2.	32
3.4	Grafo e estrutura de dados para a solução.	34
4.1	Ciclo associado à chave normalmente aberta t.	39
4.2	Círculo do ciclo de Balanceamento de Carga nulo.	40
4.3	Algoritmo de Balanceamento de Carga Irrestrito (ABCI).	44
4.4	Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito (ABCR).	45
4.5	Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito com Fronteira (ABCRCF).	46
4.6	Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado (ABCRCM).	48

4.7	Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado com Fronteira (AB-CRMF).	49
4.8	Função Auxiliar.	50
4.9	Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado <i>Multi-Tier</i> (AB-CRMMT).	51
4.10	Função Auxiliar com Fronteira.	52
4.11	Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado <i>Multi-Tier</i> com Fronteira (ABCRMMTF).	52
5.1	Topologia da rede de distribuição 1.	55
5.2	Topologia da rede de distribuição 2.	55
5.3	Topologia da rede de distribuição 3.	56
5.4	Topologia da rede de distribuição 4.	57
5.5	Fronteiras do alimentador 1 da rede de distribuição 1.	62
5.6	Chaveamento 8-7 do alimentador 1 da rede de distribuição 1.	63
5.7	Fronteiras do alimentador 12 da rede de distribuição 1.	63
5.8	Chaveamento 35-11 do alimentador 2 da rede de distribuição 1.	64
5.9	LB_{SYS} e CO_{CAP} inicial e final obtidas pela execução de ABCRM na rede de distribuição 2.	66
5.10	LB_{SYS} e CO_{CAP} inicial e final obtidas pela execução de ABCRM na rede de distribuição 3.	68
5.11	LB_{SYS} e CO_{CAP} inicial e final obtidas pela execução de ABCRM na rede de distribuição 4.	69
5.12	Chaveamento 8-3 do alimentador 1 da rede de distribuição 1.	70
5.13	Chaveamento 35-9 do alimentador 12 da rede de distribuição 1.	71
5.14	LB_{SYS} e CO_{CAP} inicial e final obtidas pela execução de ABCRMF na rede de distribuição 2.	72
5.15	Fronteiras dos alimentadores da rede de distribuição 2.	72
5.16	Multi-chaveamento do alimentador 54 da rede de distribuição 2.	75
5.17	LB_{SYS} e CO_{CAP} inicial e final obtidas pela execução de ABCRMMT na rede de distribuição 2.	76

5.18	LB_{SYS} e CO_{CAP} inicial e final obtidas pela execução de ABCRMMT na rede de distribuição 3.	77
5.19	Alimentador 2581 e adjacentes da rede de distribuição 4.	79
5.20	<i>Tier</i> 2 do multi-chaveamento do alimentador 2581 da rede de distribuição 4.	80
5.21	Retorno O <i>Tier</i> 1 do multi-chaveamento do alimentador 2581 da rede de distribuição 4.	81
5.22	Retorno ao <i>Tier</i> 0 do multi-chaveamento do alimentador 2581 da rede de distribuição 4.	82
5.23	LB_{SYS} e CO_{CAP} inicial e final obtidas pela execução de ABCRMMT na rede de distribuição 4.	83
5.24	Multi-chaveamento preservando fronteira do alimentador 54 da rede de distribuição 2.	84
5.25	LB_{SYS} e CO_{CAP} inicial e final obtidas pela execução de ABCRMMTF na rede de distribuição 2.	85
5.26	LB_{SYS} e CO_{CAP} inicial e final obtidas pela execução de ABCRMMTF na rede de distribuição 3.	86
B.1	Sistema de Distribuição.	103
B.2	Ciclo associado à chave normalmente aberta t.	112
B.3	Círculo do ciclo de Balanceamento de Carga nulo.	113
B.4	Função Auxiliar.	115
B.5	Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado <i>Multi-Tier</i>	116

Lista de Tabelas

2.1	Nomenclatura.	23
3.1	Lista de Vértices e Arestas do grafo da Figura 3.2.	32
4.1	Estrutura de Alimentadores para o <i>Multi-Tier</i>	50
5.1	Redes de distribuição empregadas nos testes computacionais.	54
5.2	Parâmetros utilizados nas aplicações dos algoritmos nas redes.	59
5.3	Resultados da Aplicação de ABCI na Rede 1.	59
5.4	Resultados da Aplicação de ABCR na Rede 1.	60
5.5	Resultados da Aplicação de ABCRF na Rede 1.	62
5.6	Resultados da Aplicação de ABCRM na Rede 1.	65
5.7	Resultados da Aplicação de ABCRM na Rede 2.	66
5.8	Resultados da Aplicação de ABCRM na Rede 3.	67
5.9	Resultados da Aplicação de ABCRM na Rede 4.	68
5.10	Resultados da Aplicação de ABCRMF na Rede 1.	70
5.11	Resultados da Aplicação de ABCRMF na Rede 2.	71
5.12	Resultado da Aplicação de ABCRMF na Rede 3.	73
5.13	Resultado da Aplicação de ABCRMF na Rede 4.	73
5.14	Resultados da Aplicação de ABCRMMT na Rede 2.	74
5.15	Resultados da Aplicação de ABCRMMT na Rede 3.	77
5.16	Resultados da Aplicação de ABCRMMT na Rede 4.	78
5.17	Resultados da Aplicação de ABCRMMTF na Rede 2.	82
5.18	Resultados da Aplicação de ABCRMMTF na Rede 3.	85
B.1	Redes de distribuição empregadas nos testes computacionais.	117

B.2	Resultados da Aplicação de Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito com Multi-Tier na Rede 1.	118
B.3	Resultados da Aplicação de Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito com Multi-Tier na Rede 2.	118
B.4	Resultados da Aplicação de Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito com Multi-Tier na Rede 3.	119

Lista de Abreviações

ABCI	Algoritmo de Balanceamento de Carga Irrestrito.
ABCR	Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito.
ABCRF	Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito com Fronteira.
ABCRM	Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado.
ABCRMF	Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado com Fronteira.
ABCRMMT	Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado Multi-Tier.
ABCRMMTF	Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado Multi-Tier com Fronteira.

Capítulo 1

Introdução

O sistema elétrico de potência serve para transportar e converter energia. As linhas de transmissão constituem o elo de ligação entre as centrais geradoras e os sistemas de distribuição. O sistema de distribuição entrega energia aos consumidores finais por meio de alimentadores primários e secundários.

O sistema de distribuição de energia é, na grande maioria, arranjado de forma radial (árvore) com o propósito de facilitar ações de proteção, como a coordenação e atenuação de correntes de curto-circuito visando a redução de custos com equipamentos. Neste sistema, a alteração da topologia é viabilizada por operações de abertura/fechamento de chaves seccionadoras localizadas em pontos estratégicos. A alteração da topologia, mantendo-se a radialidade, é realizada de forma a atender vários propósitos: reduzir as perdas ativas nos alimentadores, melhorar o perfil de tensão para os consumidores, aumentar os níveis de confiabilidade e eliminar e/ou isolar faltas para restaurar o fornecimento de energia. Assim, estas chaves seccionadoras são utilizadas para ambos os objetivos: proteção (isolamento de faltas) e reconfiguração (gerenciamento de configuração). Há também desvantagens provocadas pela alteração topológica das redes, tais como a vida útil de chaves e equipamentos, danos a consumidores, malhas (caso aconteça primeiramente o fechamento da chave) ou ilhas (efetua-se inicialmente a abertura da chave).

Na operação normal de um sistema da distribuição, o balanceamento de carga é geralmente alcançado pela reconfiguração dos alimentadores da distribuição e redistribuição de cargas entre alimentadores e transformadores. Essa alteração na estrutura topológica tem como objetivo amenizar eventuais condições de sobrecarga e promover o balanço de carga entre os

alimentadores, transferindo cargas destes mais carregados para aqueles menos carregados.

Este trabalho considera o problema de reconfiguração da rede com o objetivo de balancear a carga dos alimentadores. Considera-se também um caso particular, no qual há a necessidade de transferir carga de um determinado alimentador para os seus adjacentes por questões operativas, a fim de facilitar uma eventual manutenção ou até mesmo para reenergizar áreas “fora de serviço”.

A reconfiguração com o propósito de reenergizar áreas “fora de serviço”, durante uma falta ou manutenção, por transferência destas cargas para alimentadores adjacentes tem como principal objetivo restaurar tantas cargas quanto possível por meio de transferência de cargas desenergizadas nas áreas “fora de serviço” via reconfiguração de rede para outros alimentadores suportes da distribuição sem violar as restrições de engenharia e operação.

O trabalho está dividido em 5 capítulos.

- Na seção 1.1 é apresentada uma descrição geral dos sistemas de energia elétrica e o problema de balanceamento de carga e restauração de serviço. Também é apresentado o levantamento bibliográfico realizado para o problema de Balanceamento de Carga e Restauração de Serviço, Seção 1.2;
- O Capítulo 2 apresenta um modelo de grafos para a representação do sistema de distribuição, o método de fluxo de carga e a formulação do problema;
- O Capítulo 3 contém a modelagem computacional desenvolvida, o diagrama de classes e uma breve descrição de cada uma delas;
- O Capítulo 4 define otimização combinatória, faz uma breve revisão do conceito de índice de classificação de chaves, descreve o método *Distance Measurement Technique* e em seguida faz uma abordagem sobre multi-chaveamento. Também é apresentado o algoritmo para resolução do balanceamento de carga e as várias modificações implementadas;
- Testes e resultados obtidos com a aplicação das metodologias a redes de distribuição, incluindo estudos com redes reais de cidades brasileiras, são apresentados no Capítulo 5;
- Conclusões sobre o trabalho e perspectivas futuras são apresentadas no Capítulo 6.

1.1 Sistemas de Energia Elétrica

Os sistemas elétricos de potência têm como função principal fornecer energia elétrica de qualidade aos usuários, na capacidade solicitada a cada instante. Três etapas fundamentais compõem um sistema de energia elétrica: Geração, Transmissão e Distribuição.

O sistema de geração se encarrega de transformar energia hidráulica, térmica, nuclear, eólica, entre outras, em energia elétrica. No Brasil, devido ao grande potencial hídrico existente, predomina o modo hidroelétrico. Para que esta energia gerada seja transportada, a tensão deve ser elevada para a tensão de transmissão.

O sistema de transmissão/subtransmissão transporta a energia demandada em altos níveis de tensão, que são estabelecidos pela distância a ser percorrida e pela quantidade de energia a ser transportada. A energia transportada na tensão de transmissão é fornecida para alguns consumidores e reduzida para tensão de subtransmissão. Neste nível, a energia é fornecida para consumidores e também rebaixada para os padrões do sistema de distribuição.

O sistema de distribuição fornece aos consumidores finais a quantidade de energia demandada. A rede de distribuição primária abastece consumidores de média tensão e transformadores de distribuição, dos quais deriva a rede de distribuição secundária ou rede de baixa tensão.

A Figura 1.1 mostra simplificada um sistema de energia elétrica contendo três usinas, um conjunto de linhas de transmissão, uma rede de subtransmissão, uma rede de distribuição primária e três de distribuição secundária (Kagan et al. 2005).

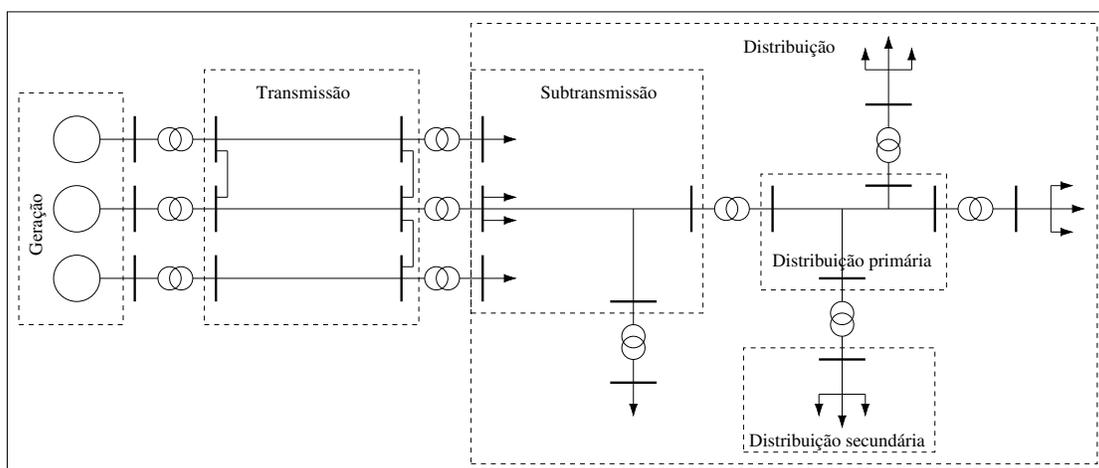


Figura 1.1: Sistema de Energia Elétrica.

No sistema de geração a tensão é da ordem de dezenas de kV (na faixa de 13,8 kV a 24 kV). Na transmissão os níveis de tensão são elevados na ordem de centenas de kV (de 115 a 765 kV). A primeira redução de tensão de linha de transmissão se dá na subestação de transmissão onde a redução ocorre na faixa de 34,5 a 138 kV. Alguns usuários industriais podem ser abastecidos nesses níveis de tensão. A próxima redução se dá na subestação de distribuição, onde a tensão de linha que saem dessa subestação ficam em torno de 4 a 34,5 kV, mais comumente entre 11 e 15 kV. Este é o sistema primário de distribuição, que será abordado nesta dissertação. Muitas cargas industriais são alimentadas a partir do sistema primário, que também alimenta os transformadores de distribuição que fornecem tensões secundárias para uso residencial. A tensão está padronizada nos valores 220/127 V e 380/220 V. (Decreto nº 73.080, de 5 de Novembro de 1973). (Stevenson 1986).

1.1.1 Sistema de Distribuição

O sistema de distribuição subdivide-se em rede primária e rede secundária, conforme ilustra a Figura B.1. A rede de distribuição primária, ou de média tensão, parte diretamente das subestações rebaixadoras, atende aos consumidores de média tensão e alimenta os transformadores de distribuição, que por sua vez alimentam a rede de distribuição secundária, ou baixa tensão, suprindo os consumidores de baixa tensão.

A rede primária é composta por alimentadores e equipamentos de manobra (chaves), proteção (disjuntores e religadores), correção (reguladores de tensão e banco de capacitores) e transformação. Os alimentadores são constituídos por condutores que partem da subestação até os transformadores de distribuição. As chaves possibilitam manobras para transferências de carga entre os alimentadores. Os equipamentos de proteção evitam danos aos equipamentos do sistema de distribuição assim como aos equipamentos nele interligados. Os equipamentos de correção podem ser de tensão (reguladores de tensão) e de fator de potência (banco de capacitores), mantendo os níveis de tensão e fator de potência dentro dos limites aceitáveis. E os equipamentos de transformação reduzem a tensão aos níveis adequados para cada consumidor.

A rede secundária é composta pelo transformador da distribuição e pelos condutores que transportam a energia até os medidores, que determinam o valor consumido pelos consumidores.

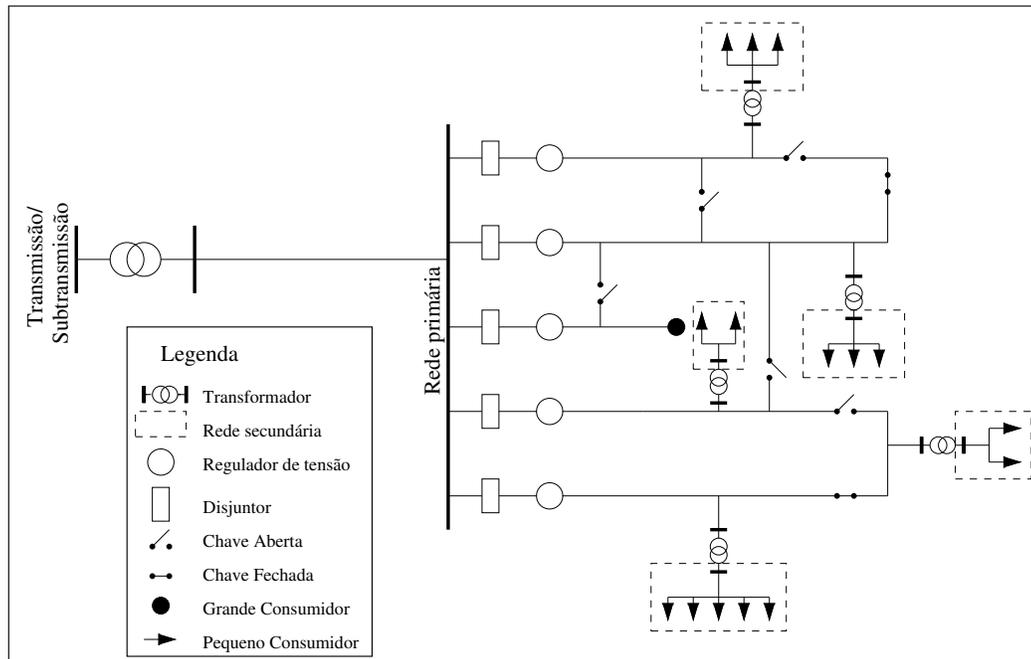


Figura 1.2: Sistema de Distribuição.

1.1.2 Topologias do Sistema de Distribuição

A rede de distribuição pode se apresentar conforme duas topologias: radial ou malhada, conforme ilustram as Figuras 1.3 e 1.4.

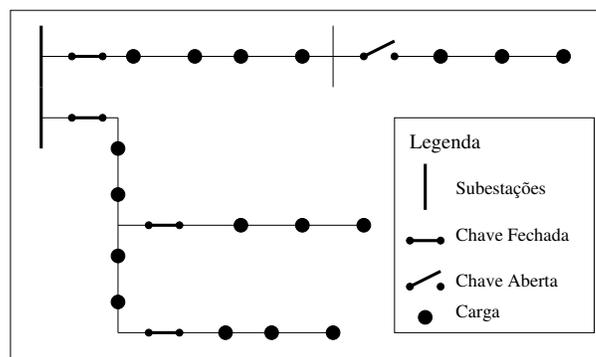


Figura 1.3: Topologia Radial.

A topologia radial apresenta certas vantagens em relação à topologia malhada: menor nível de curto circuito, simplicidade nas operações de chaveamento e facilidade no emprego de equipamentos de proteção. Por outro lado, uma estrutura radial é pouco confiável do ponto de vista operacional pois não garante alternativas de suprimento no caso de falhas ou sobrecargas. Desta forma, para agregar as vantagens de ambas estruturas, os sistemas de distribuição são

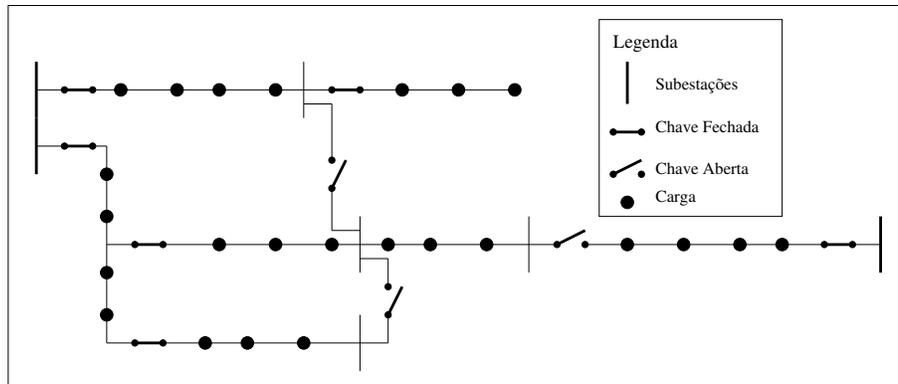


Figura 1.4: Topologia malhada.

construídos como redes malhadas e operados, em sua maioria, como redes radiais.

Com isso, não é permitida a ocorrência de ciclos sempre que a forma radial é adotada para operação. Entretanto, há possibilidade de transferência de blocos de cargas entre alimentadores, que são interligados por chaves normalmente abertas. Esta interligação aumenta a confiabilidade do sistema, permitindo a operação em condições de contingência devido à manutenção corretiva ou preventiva e em situações de emergência.

1.1.3 Estados do Sistema de Distribuição

O sistema de distribuição tem a função de fornecer aos consumidores a quantidade de energia demandada (restrição de carga) com qualidade adequada (restrições de operação: limites de tensão e corrente).

O sistema de distribuição pode operar em três estados distintos:

- Normal: quando todas as restrições, tanto de carga como de operação, estão satisfeitas.
- Emergência: quando ocorrem falhas e as restrições de tensão e corrente não são mais satisfeitas.
- Restauração: a rede passa a operar em estado de restauração quando o defeito é identificado e a área isolada.

1.1.4 Reconfiguração de Rede

Em um sistema de distribuição primário, as chaves normalmente abertas são usadas para proteção, para isolar faltas e reconfigurar a rede.

Reconfiguração de rede é um processo de alteração da estrutura topológica dos alimentadores do sistema de distribuição pela mudança do estado aberto/fechado das chaves, mantendo-se a estrutura radial.

Diversas configurações de rede podem ser obtidas pela abertura e fechamento de chaves, como ilustram as Figuras 1.5 e 1.6. O número elevado de possíveis configurações caracteriza este problema como um problema de otimização combinatória complexo. Em sistemas grandes é inviável enumerar todas as configurações possíveis.

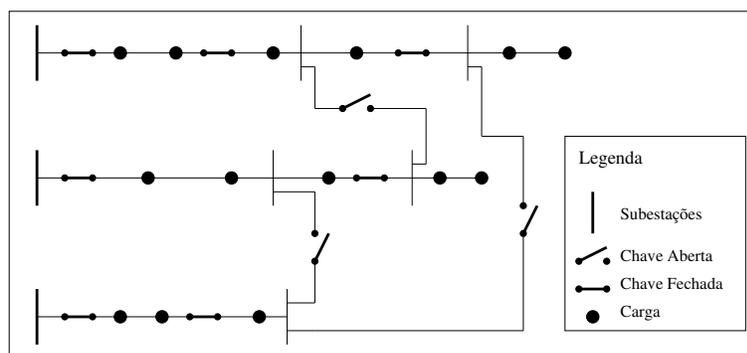


Figura 1.5: Rede em operação normal.

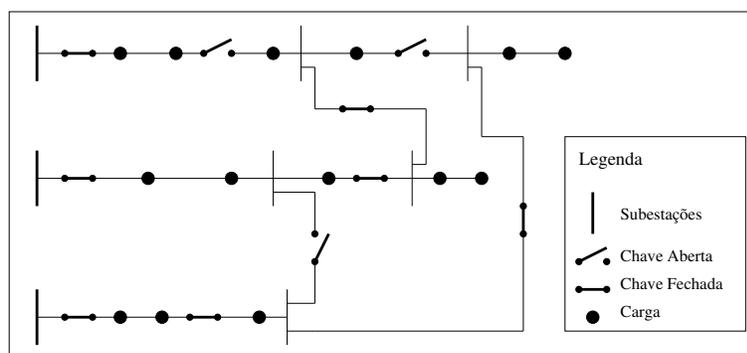


Figura 1.6: Rede reconfigurada.

No Brasil, a maioria das redes de distribuição apresenta poucas chaves. Conseqüentemente, a confiabilidade do sistema diminui, afinal uma determinada carga não terá muitas formas de ser alimentada. As manobras das chaves podem ser feitas remotamente, através de um sistema automático, ou localmente, pela equipe de manutenção.

Um número mínimo de intervenções ou chaveamentos na rede deve nortear qualquer solução para o problema de reconfiguração pelas seguintes razões:

- Alterar de forma substancial a topologia do sistema pode ocasionar a perda de sensibilidade do operador em função da difícil previsão dos impactos causados;
- O retorno à configuração original torna-se mais fácil;
- As operações de chaveamento geram perturbações que aumentam a possibilidade de danos aos equipamentos;
- A maioria dos chaveamentos é manual, o que pode requerer um tempo considerável para implementá-los.

Quando as condições de operação mudam, a rede é reconfigurada para reduzir as perdas no sistema e para aliviar sobrecargas na rede. O primeiro problema é de reconfiguração de rede para redução de perdas e o segundo de balanceamento de carga. A restauração do serviço pode ser alcançada por transferência de cargas entre alimentadores, objetivando o balanceamento de carga.

Tanto o problema de Reconfiguração de Rede para Balanceamento de Carga como o de Restauração de Serviço são problemas relativos ao sistema de distribuição e envolvem a resolução de complexos problemas de otimização combinatória que em muitos casos requerem rapidez de execução por seu caráter emergencial, como é o caso da necessidade de restaurar energia depois de desligamentos ocasionados por tempestades e raios.

A rede elétrica de distribuição primária, escopo desta dissertação, emerge das subestações de distribuição até os consumidores primários, que são atendidos neste nível de tensão, e os transformadores de distribuição, que suprem os consumidores conectados à rede secundária.

Balanceamento de Cargas

O balanceamento de carga entre alimentadores no sistema de distribuição corresponde a uma redistribuição de cargas entre os mesmos.

Pela mudança do estado aberto/fechado das chaves no sistema distribuição, algumas cargas podem ser transferidas de um alimentador para outro, tornando o sistema mais balanceado e reduzindo o risco de sobrecarga.

Restauração do Serviço

O principal objetivo da restauração de serviço é restabelecer o fornecimento para a maior área possível por meio de transferências de cargas desenergizadas na área “fora de serviço”, via reconfiguração de rede, para outros alimentadores da distribuição, sem violar as restrições de operação e engenharia.

1.2 Revisão Bibliográfica

Na década de 80, foram desenvolvidos trabalhos propondo técnicas para a resolução do problema de balanceamento de carga através de operações de chaveamento (troca de ramos). Nos primeiros trabalhos, o balanceamento de carga foi formulado como um problema de programação inteira (Aoki et al., 1988) e como problema de otimização não-linear (Baran e Wu, 1989). Na década seguinte, o problema de balanceamento foi tratado como um problema de otimização multiobjetivo abordando metaheurísticas (Chiang e Jean-Jumeau, 1990). Ainda nesta década, houve trabalhos que empregaram técnicas heurísticas (Hsu et al., 1993; Jwo-Hwu, 1997) e mais recentemente o problema foi abordado com um método gráfico, *distance measurement technique* (Kashem et al., 1999).

O problema de restauração de serviço, aos fins dos anos 80, foi proposto aproveitando o máximo conhecimento dos operadores, utilizando heurísticas (Aoki et al., 1989; Morelato e Monticelli, 1989) ou baseadas em Sistemas Especialistas (Cavellucci, 1989). Na década de 90, técnicas heurísticas continuaram tendo relativa importância (Wu et al., 1991; Shirmohammadi, 1992; Miu et al., 1998). A seguir, as metaheurísticas começaram a ser empregadas (Toune et al., 1998a; Toune et al., 1998b; Augugliaro et al., 1998; Fukuyama, 2000; Toune et al., 2002). Houve também abordagens que empregaram lógica *fuzzy* (Augugliaro et al., 2000). Mais recentemente, o problema de restauração de serviço tem sido abordado no aspecto multicritério com técnicas de multichaveamento (Miu et al., 2000) e Busca Tabu (Garcia e França, 2005).

1.2.1 Balanceamento de Cargas

Na década de 80, Civanlar et al. (1988) propõem o método de troca de ramos que é provavelmente a alternativa mais utilizada para reduzir perdas em sistema de distribuição. O

procedimento tem início com uma configuração de operação radial. Para cada chave aberta, onde haja uma diferença de tensões entre seus terminais, é identificado o anel que se formará na rede se essa chave for fechada. Percorrendo esse anel, a partir do terminal de maior diferença de potencial, procura-se uma chave que, quando aberta, proporcione a maior redução de perdas (em relação a configuração atual). Se existir tal chave, é realizado o fechamento da primeira e a abertura da segunda (a troca de ramos). As perdas resistivas são reduzidas sem se perder a estrutura radial do sistema. As configurações são modificadas por trocas de ramos até que não seja mais possível melhorar a solução (ou que os ganhos sejam insignificantes). Desta forma, consegue-se eliminar um grande número de operações indesejáveis, diminuindo o esforço computacional.

Aoki et al. (1988) propõem um algoritmo para o problema de balanceamento de carga nos transformadores das subestações e nos alimentadores, visando a minimização de perdas tanto em estado normal de operação como em estados de falhas ou saídas programadas. O método procura chegar a soluções aproximadas e práticas para o sistema. O algoritmo aplica uma base de regras para manter a característica radial do sistema e para evitar repetições nas operações de chaveamento. Através de índices de balanceamento de carga para cada transformador e alimentador, operações de chaveamento (troca de ramos) são executadas entre dois alimentadores, com o maior e menor índice, e é repetido entre os outros alimentadores até que as cargas sejam o mais equalizado possível. Os autores comentam a dificuldade de se obter uma solução ótima, em função da dimensão do sistema e não explicam se o método é eficiente para aplicação em tempo real.

Baran e Wu (1989) desenvolveram uma formulação geral e métodos de soluções para problemas de minimização de perdas e balanceamento de carga. O princípio dos métodos que usam troca de ramos (do inglês *branch-exchange*) é buscar a melhor configuração segundo a função objetivo definida (balanceamento de carga ou redução de perdas), partindo-se de uma solução factível e sempre observando as restrições (tensão, capacidade da linha/transformador e confiabilidade). Para guiar a busca por configurações radiais relevantes, dois métodos de fluxo de potência no sistema de distribuição foram utilizados: *Simplified DistFlow Method* e *Backward and Forward Update of DistFlow*. Os testes para redução de perdas utilizaram um sistema hipotético composto de 32 barramentos e 5 chaves normalmente abertas. Em geral, *Backward and Forward Update Method* é mais confiável que o *Simplified DistFlow Method*

na estimativa de perdas especialmente quando o valor destas perdas for pequeno. Portanto a decisão de qual método usar para deve ser feito considerando a magnitude da redução de perdas. Os autores afirmaram que o método *Simplified DistFlow Method* parece ser mais apropriado para balanceamento de carga, por causa da natureza relativa do conceito de balanceamento de carga.

Chiang e Jean-Jumeau (1990) definiram um problema de otimização não-diferenciável e multi-objetivo com restrições de igualdade e desigualdade para redução de perdas e balanceamento de carga. A metodologia é baseada em duas etapas de solução: uma técnica modificada de *simulated annealing* e o método ϵ -*constraint* para problemas de otimização multi-objetivo.

No trabalho de Hsu et al. (1993), um algoritmo de busca heurística baseado em algumas regras heurísticas foi proposto para alcançar a operação de chaveamento desejado que obtenha o balanceamento de carga entre transformadores/alimentadores. Os autores afirmam que a solução pode ser um mínimo local.

Mais tarde, a fim de alcançar uma melhor solução, uma busca heurística refinada para o balanceamento de carga entre os alimentadores e transformadores (simultaneamente) foi proposta por Jwo-Hwu (1997). Neste trabalho, o balanceamento é obtido com a minimização do índice de desempenho, que é a soma dos quadrados do erro de carga dos transformadores e alimentadores. O erro de carga é a diferença entre a quantidade de carga de cada transformador/alimentador e o valor desejado para ótimo balanceamento entre os mesmos. Algumas considerações foram feitas: os nós consumidores são conhecidos, a condição de balanceamento trifásica é assumida e a estrutura de rede é fixa, somente o estado da chave pode ser modificado. A rede é sempre radial e não há carga fora de serviço. Os resultados computacionais contemplam uma rede com 10 nós consumidores e 13 chaves seccionadoras.

O trabalho de Kashem et al. (1999) tem como objetivo principal minimizar o índice de balanceamento do sistema de distribuição, respeitando as condições mínimas de operação tais como radialidade, quedas de tensões, limites dos fluxos nas linhas e a capacidade dos alimentadores. A metodologia proposta é baseada no algoritmo chamado de *distance measurement technique (DMT)*. Este algoritmo tem duas etapas fundamentais: na primeira encontra-se o ciclo que proporciona o maior balanceamento entre os alimentadores do sistema de distribuição; na segunda etapa é escolhida a chave para interromper o ciclo determinado na etapa anterior que promova o maior balanceamento de carga dos alimentadores envolvidos. Os resultados repor-

tados contemplam uma rede hipotética com 69 barramentos. A técnica desenvolvida elimina a necessidade de considerar a troca de ramos em outros ciclos do sistema e também reduz o número de execuções do fluxo de carga.

Kashem et al. (2000) apresentam uma formulação geral do problema do reconfiguração do alimentador para minimização de perdas e propõem um novo método de solução. Uma fórmula simples é apresentada para calcular a mudança nas perdas do sistema, devido à operação de chaveamento. Esta fórmula é válida contanto que as tensões de sistema permaneçam dentro dos limites da estabilidade. A principal vantagem da fórmula é a eliminação da necessidade de se executar o fluxo de carga para cada operação de chaveamento. O método pode identificar a operação de chaveamento que dá redução máxima nas perdas totais do sistema. Os testes foram feitos em uma rede de distribuição radial hipotética de 12.66kVA com 33 barramentos e comparados com o método desenvolvido por Baran e Wu (1989). A configuração final obtida para a minimização de perdas no método proposto é diferente da configuração obtida por Baran e Wu (1989). Os resultados indicam que as perdas de potência reais são reduzidas significativamente e a tensão na rede é melhorada consideravelmente usando o método proposto.

1.2.2 Restauração do Serviço

Na década de 80, Aoki et al. (1989) propõem um método gradiente dual efetivo para o problema de restauração de serviço. O novo algoritmo proposto restaura rapidamente as cargas desenergizadas no sistema de distribuição usando chaves seccionadoras. A restauração de serviço envolve a energização das cargas na parte isolada da rede, transferindo-as para alimentadores adjacentes por meio de manobras das chaves seccionadoras. O algoritmo se desenvolve em etapas: primeiramente, transfere todas as cargas desenergizadas para alimentadores adjacentes (alimentador principal), então, se necessário, o multi-estágio é implementado em dois estágios: no primeiro estágio as cargas são transferidas do alimentador principal para os alimentadores do primeiro estágio e no segundo estágio, dos alimentadores do primeiro estágio para os outros. As restrições consideradas são: limites de fluxo nas linhas, queda de tensão adequada nos nós consumidores, capacidade dos alimentadores e radialidade. A função objetivo a otimizar: restaurar tantas cargas quanto possível. Os resultados computacionais obtidos para uma pequena rede com 6 alimentadores e 78 nós consumidores e para uma rede maior com 87 alimentadores e 1188 nós consumidores demonstram a rapidez e a eficiência em evitar

operações de chaveamento desnecessárias.

O trabalho de Morelato e Monticelli (1989) propõe resolver o problema de restauração de serviço através de uma busca heurística que percorre uma árvore de decisão binária, onde o conhecimento específico é utilizado como guia na busca. O estado de cada chave pode ser aberto (0) ou fechado (1). A cada nível da árvore define-se uma variável de decisão, sendo que os estados determinam o caminho até as folhas. A busca heurística utilizada compreende uma busca em profundidade onde uma solução é encontrada e é testada a sua factibilidade. Caso não seja factível, um *backtrack* é iniciado em busca de outra solução. Os resultados obtidos com uma rede de 20 nós consumidores, 33 chaves e 4 alimentadores indicam o potencial da técnica proposta.

Cavellucci (1989) propõe um sistema integrado para visualização e determinação de planos de manobra quando da ocorrência de uma contingência. Esses planos são determinados a partir de um sistema especialista, o qual é baseado nos procedimentos empregados nos centros de controle dos sistemas de distribuição. Para cada plano de manobra sugerido pelo sistema especialista, todos os requisitos elétricos são verificados.

O trabalho de Shirmohammadi (1992) consistiu na implementação de uma metodologia heurística para determinar um número mínimo de operações de chaveamento para restauração de serviço em áreas isoladas do sistema de distribuição via reconfiguração de redes. O procedimento utilizado ocorre em diversas etapas, sendo inicialmente abertas as chaves que possibilitam o isolamento da área afetada pela falta e depois é criada uma rede malhada por meio do fechamento de todas as chaves. Em seguida, é executado um fluxo de carga para redes desse tipo, classificando as chaves quanto ao fluxo de potência que as atravessa. A chave que apresenta o menor fluxo é então aberta e esse procedimento se repete até encontrar uma rede radial.

Um método de busca sistemático foi desenvolvido por Wu et al. (1991) para identificar a opção de chaveamento factível respeitando a radialidade do sistema. Baseado na estrutura de busca proposta, as regras heurísticas e as funções de avaliação são exploradas a fim de encontrar uma solução com o mínimo de operações de chaveamento e o balanceamento da carga do sistema. A aplicação do método desenvolvido é realizada em uma rede com 6 alimentadores e 27 chaves e em uma rede real com 198 chaves e 163 nós consumidores.

Uma Busca Tabu Reativa é utilizada na operação de transferência de carga para restau-

ração de serviço em Fukuyama (2000) e Toune et al. (1998a). Em Fukuyama (2000), tanto o problema de restauração de serviço como o problema de reconfiguração da rede visando redução de perdas são resolvidos através de um método de Busca Tabu Reativa. A formulação do problema tem como função objetivo contrabalançar a capacidade reserva de cada fonte de potência e maximizar a mínima tensão da rede. O problema de reconfiguração de rede para redução de perdas tem como objetivo minimizar as perdas. Para os dois casos as restrições consideradas são: de limite de fornecimento dos alimentadores e de fluxo nas linhas, queda de tensão nos consumidores, assim como radialidade. As conclusões elegem a Busca Tabu Reativa como o método mais eficiente, rápido e com resultados altamente promissores.

Da mesma forma, o problema de restauração de serviço tratado por Toune et al. (1998a) tem como objetivo equalizar a capacidade reserva de cada fonte de potência e maximizar a tensão mínima da rede, sujeito às restrições de limite de fornecimento dos alimentadores e de fluxo nas linhas, queda de tensão nos consumidores e de radialidade. A rede empregada nos testes é composta por 3 transformadores e cada transformador tem 6 alimentadores. Os resultados apontam uma vantagem da Busca Tabu Reativa frente a outras metaheurísticas.

Quando a área “fora de serviço” não pode ser restaurada somente pelas fontes de potência vizinhas, o multi-estágio é requisitado para aumentar esta capacidade. Para este problema, um sistema híbrido usando sistema especialista e Busca Tabu Reativa é proposto por Toune et al. (1998b). O sistema especialista (do inglês *Expert System*) determina a operação multi-estágio das chaves para aumentar a margem de suprimento da fonte de potência quando a capacidade da fonte não é suficiente para restaurar toda a carga desenergizada. A Busca Tabu Reativa determina a operação das chaves para decompor a área “fora de serviço” em áreas parciais para cada fonte de potência. Assim como o trabalho de Fukuyama (2000) e Toune et al. (1998a), Toune et al. (1998b) também tratam as restrições de limite de fornecimento dos alimentadores e de fluxo nas linhas, queda de tensão nos consumidores, assim como radialidade. A função objetivo visa aumentar a capacidade reserva de cada fonte de potência e maximiza a mínima tensão da rede.

As metaheurísticas também foram amplamente utilizadas para resolver o problema de restauração do serviço e transferência de carga. Em Toune et al. (2002) é apresentado um estudo comparativo de quatro metaheurísticas para restauração de serviço em sistemas de distribuição: *simulated annealing* (Mori e Takeda, 1994), algoritmos genéticos (Fukuyama et al., 1996), Busca Tabu e Busca Tabu Reativa (Toune et al., 1998a). É estabelecida a mesma representação

da solução e metodologia para gerar as soluções iniciais. A formulação do problema tem como função objetivo a soma ponderada entre o balanço de carga maximizando a tensão mínima de fornecimento, considerando a restrição de radialidade, de limites de fluxo nas linhas, de quedas de tensão e de capacidade dos alimentadores. Os resultados das simulações indicam a eficiência do método Busca Tabu Reativa quanto ao número de cargas restauradas e ao tempo gasto.

O problema de restauração de serviço com prioridade de clientes é formulado como um problema multi-objetivo sujeito às restrições de operação e de engenharia (Miu et al., 1998). A função objetivo maximiza a carga prioritária restaurada, maximiza a carga total restaurada e minimiza o número de manipulações de chaves. As restrições consideradas são: radialidade, limites de fluxo, quedas de tensão e capacidade dos alimentadores. Miu et al. (1998) desenvolveram um método de busca baseado em quatro índices usados para diferenciar as chaves da rede:

- Distância Geográfica: é a distância entre a chave e área onde há a falta.
- Capacidade de Reposição: para cada ramo no caminho entre a chave e a subestação, o fluxo de corrente calculado é comparado com a capacidade do ramo ou o máximo da corrente de falha do dispositivo de proteção, a menor margem representa esta capacidade.
- Distância Elétrica: é a impedância entre dois barramentos.
- Carga Transferível: é definida como a quantidade de carga que cada chave aberta pode transferir para cada chave fechada.

Cabe observar que o algoritmo é executado de forma independente para cada área sem fornecimento, que pode causar erros. A rede utilizada nos testes possui 83 chaves e 208 nós consumidores.

A seguir, Miu et al. (2000) apresentaram uma nova formulação incluindo o controle de bancos de capacitores e a transferência de carga em vários níveis a partir da região afetada. Neste trabalho, cada área da rede sem fornecimento de energia elétrica é tratada separadamente, e o método desenvolvido também utiliza os índices (Miu et al., 1998). Os objetivos a otimizar são: maximizar a área total restaurada, maximizar a área total prioritária restaurada, minimizar o número de manipulações de chave, minimizar a distância geográfica e ainda minimizar o número de manipulações nos capacitores. As restrições operacionais tratadas são: limites de fluxo,

de queda de tensão e de capacidade de alimentadores. Os resultados obtidos com uma rede de 201 nós consumidores e 76 chaves demonstram a aplicabilidade da proposta desenvolvida.

Augugliaro et al. (1998) propõem uma estratégia de hibridização de algoritmos genéticos e Augugliaro et al. (2000) propõem a utilização de estratégias evolutivas juntamente com a lógica fuzzy. Estes dois trabalhos apresentam uma abordagem multi-objetivo considerando os objetivos de minimizar perdas elétricas e maximizar o número de cargas restauradas. As restrições consideradas compreendem radialidade, limite de fluxo de potência, de queda de tensão e de capacidade dos alimentadores. A rede utilizada em Augugliaro et al. (1998) e Augugliaro et al. (2000) é empregada nos testes computacionais deste trabalho.

Recentemente, Garcia e França (2005) desenvolveram uma Busca Tabu multiobjetivo para o problema de restauração do serviço. O método desenvolvido tem como objetivos minimizar a carga não restaurada e o número de operações de chaveamento envolvidas. As restrições consideradas são: radialidade, limites de fluxo, quedas de tensão e capacidade dos alimentadores. A rede empregada nos testes é composta de 417 nós consumidores e 63 chaves, com tempo de resolução da ordem de 4 segundos, obtidos com um computador Pentium 4 2.8GHz PC.

Capítulo 2

Formulação do problema

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos sobre grafos usados para representar os sistemas de distribuição e o método adotado para o cálculo dos fluxos de potências na rede. Em seguida é apresentada a formulação matemática para o problema de reconfiguração de rede por balanceamento de carga em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.

2.1 Representação da Rede de Distribuição

A rede de distribuição primária será objeto de estudo no problema de reconfiguração de redes para restauração de serviço e balanceamento de carga. Essa rede, conforme exemplo da Figura 2.1, pode ser representada por grafos (Ahuja et al., 1993), justamente pela possibilidade de implementar algoritmos eficientes e pela abstração intuitiva da rede. A representação das funções e relações entre as entidades da rede são facilmente incluídas no modelo de grafo.

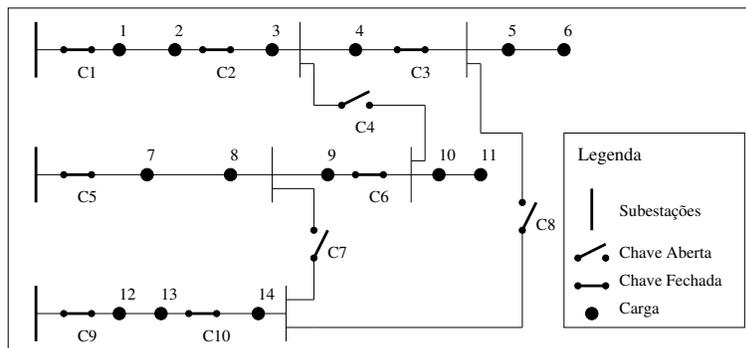


Figura 2.1: Rede de Distribuição Primária.

Um grafo $G = (N, A)$ é definido como um conjunto $\{N\}$ finito e não vazio de nós e um conjunto $\{A\}$ de arcos, cujos elementos são pares de nós distintos.

Um caminho de um grafo $G = (N, A)$ é composto por uma sequência de nós n_1, n_2, \dots, n_k tal que (n_j, n_{j+1}) pertence a $\{A\}$, $\forall j \in P, j \neq k$, onde P é o conjunto de nós do caminho. Um caminho com k nós é formado por $k - 1$ arcos de comprimento $k - 1$.

Um ciclo é um caminho n_1, n_2, \dots, n_k , onde $n_1 = n_{k+1}$ e $k \geq 3$. Um grafo é acíclico se ele não contém ciclos. Um grafo é conexo se existe um caminho entre quaisquer pares de nós do grafo.

Na Figura 2.2 tem-se um exemplo de grafo detalhando o conjunto de nós, arcos e alguns caminhos. Este grafo é acíclico e conexo.

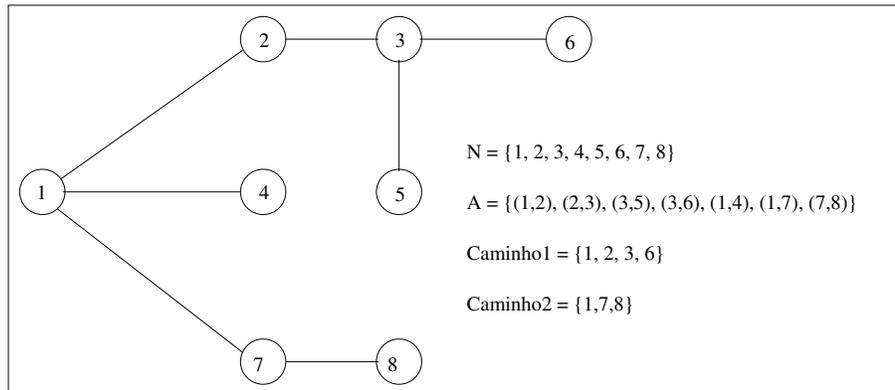


Figura 2.2: Exemplo de Grafo.

A Figura 2.3 mostra a representação da rede de Distribuição Primária ilustrada na Figura 2.1 em forma de grafo. Na Figura, o conjunto de nós é formado pelas subestações, cargas e/ou bloco de cargas. A inclusão de um nó raiz (R) facilita o tratamento de conectividade da rede. O conjunto de arcos é representado por chaves abertas, chaves fechadas e cabos. O grafo que representa uma rede de distribuição é um grafo não orientado, porque um cabo pode ter fluxo de potência em ambos os sentidos.

Uma árvore é um grafo conexo que não tem ciclos. Uma árvore com n nós, contém $n - 1$ arcos. Um grafo (não conexo) formado por um conjunto de árvores é chamado de floresta.

A topologia da rede de distribuição pode ser representada por uma árvore. A Figura 2.4 ilustra a árvore da rede de distribuição da Figura 2.1.

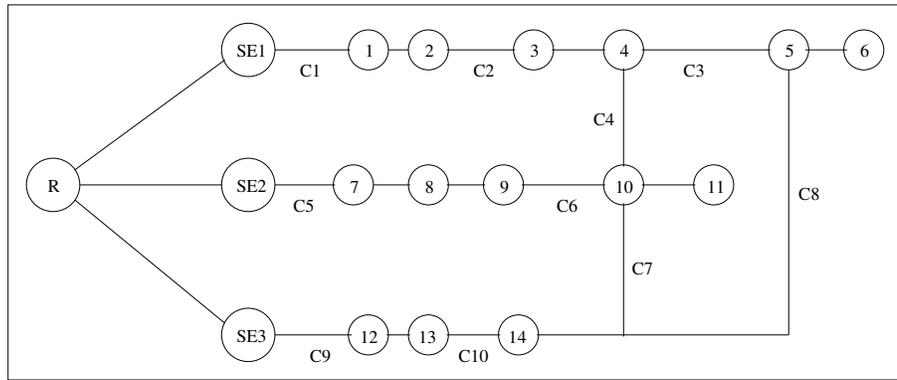


Figura 2.3: Grafo da Rede de Distribuição Primária da Figura 2.1.

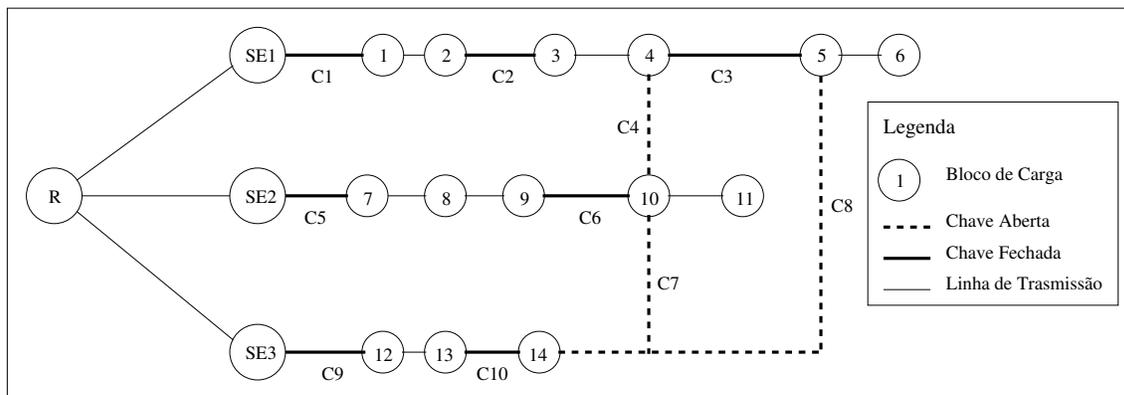


Figura 2.4: Árvore da Rede de Distribuição Primária da Figura 2.1.

2.2 Fluxo de Potência em Redes de Distribuição

Para verificar se as restrições do problema de reconfiguração de rede estão sendo respeitadas é necessário um método que calcule os fluxos de potência na rede considerada. O método que calcula os fluxos de potência realiza a atualização dos fluxos nos arcos e das tensões nos nós, o que sugere o emprego de um método rápido quando se trata de redes de grande porte.

O método escolhido foi o fluxo de potência *Backward-Forward Sweep*, ou varredura vai e vem, proposto por Baran e Wu (1989). Embora seja um método numérico aproximado (em função de sua tolerância escolhida), sua eficiência em fornecer uma boa aproximação do fluxo real CA em um tempo computacional muito razoável tornou-o muito adequado para a proposta da tese.

O algoritmo do método *Backward-Forward Sweep* consiste em dois passos básicos, a varredura *backward*, onde são calculadas as correntes ou fluxos de potência com as possíveis

atualizações das tensões, e a varredura *forward*, que realiza os cálculos das quedas de tensão com as atualizações das correntes elétricas. Esses passos são repetidos até que se obtenha a convergência do algoritmo.

O processo da resolução inicia determinando o valor da tensão em todas as barras da rede de distribuição; normalmente define-se como sendo a tensão da subestação. Após a tensão definida calculam-se as correntes de carga das barras. Partindo das últimas barras de cada ramo, é realizado o somatório das correntes das cargas (etapa *backward*), até a chegada na barra da subestação, encontrando a corrente total da rede. A seguir, usando os valores das correntes dos ramos, e partindo da subestação, são calculados os novos valores das tensões em todas as barras do sistema (etapa *forward*). Recalculam-se as novas correntes do sistema.

Esse processo se repete até que a convergência seja atingida, dada por uma variação estabelecida entre a potência calculada e a potência efetiva, ou algum critério de parada seja satisfeito, como por exemplo o número de iterações (Baran e Wu, 1989).

A Figura 2.5 apresenta um diagrama de uma rede de distribuição. Em cada barra de carga i é considerada uma injeção de potência constante dada por $S_i = P_i + jQ_i$ (P_i se refere à potência ativa e Q_i se refere à potência reativa), com uma tensão de $V_i = V_{i_{RE}} + jV_{i_{IM}}$ ($V_{i_{RE}}$ é a parte real e $V_{i_{IM}}$ é a parte imaginária do fasor V_i). Define-se um conjunto de arcos $A = \{a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, \dots, a_{in}\}$ que saem da barra i . O arco que une a barra i à barra $i + 1$ apresenta uma impedância $z_k = r_k + jx_k$ (r_k é a resistência e x_k é a reatância) e uma corrente $I_k = I_{k_{RE}} + jI_{k_{IM}}$ ($I_{k_{RE}}$ é a parte real e $I_{k_{IM}}$ é a parte imaginária).

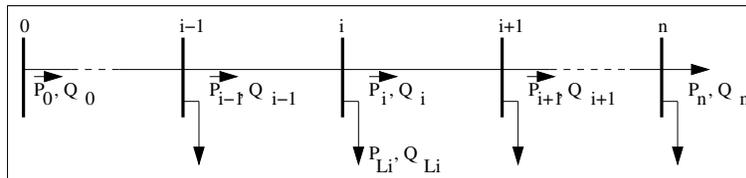


Figura 2.5: Diagrama de uma Rede de Distribuição.

Backward Sweep

O método *Backward Sweep* consiste em fixar as tensões nas barras e, através do somatório das correntes das cargas, determinar as correntes dos ramos, começando pelos arcos terminais e caminhando em direção à subestação. Para determinar a corrente em cada arco do conjunto A

utilizam-se as equações (2.1) e (2.2).

$$I_{k_{RE}} = \sum_{l \in A_i} (I_{l_{RE}}) + \frac{(P_i V_{i_{RE}} + Q_i V_{i_{IM}})}{V_i^2}, \forall k \in A_{i-1} \quad (2.1)$$

$$I_{k_{IM}} = \sum_{l \in A_i} (I_{l_{IM}}) + \frac{(P_i V_{i_{IM}} - Q_i V_{i_{RE}})}{V_i^2}, \forall k \in A_{i-1} \quad (2.2)$$

Forward Sweep

Na etapa *Forward Sweep* as tensões das barras são atualizadas, partindo da subestação em direção as últimas barras de cada ramo, através das equações (2.3) e (2.4).

$$V_{(i+1)_{RE}} = V_{i_{RE}} - (r_k I_{k_{RE}} - x_k I_{k_{IM}}) \quad (2.3)$$

$$V_{(i+1)_{IM}} = V_{i_{IM}} - (x_k I_{k_{RE}} + r_k I_{k_{IM}}) \quad (2.4)$$

Convergência

A convergência deste método é avaliada através das equações (2.5) e (2.6), que fornecem a variação entre a potência calculada, obtida através da corrente na etapa *backward sweep* e da tensão da etapa *backward sweep*, e a potência efetiva na barra i . A convergência é considerada tanto para a potência ativa como para a reativa. Caso o valor de uma das potências seja maior que a tolerância escolhida, mesmo que seja em poucas ou somente uma barra, considera-se que o algoritmo não convergiu.

$$\Delta P_i = |(V_{i_{RE}} I_{i_{RE}} + V_{i_{IM}} I_{i_{IM}}) - P_i| \quad (2.5)$$

$$\Delta Q_i = |(V_{i_{IM}} I_{i_{RE}} + V_{i_{RE}} I_{i_{IM}}) - Q_i| \quad (2.6)$$

2.3 Formulação Matemática do Problema

Neste trabalho, o problema de reconfiguração da rede de distribuição primária é formulado tendo como objetivo o balanceamento de carga entre os alimentadores. Este critério tem

se mostrado relevante pelas concessionárias de energia elétrica por ter dupla utilidade: além de minimizar as perdas da rede ele também tem um caráter de aumentar a sua confiabilidade, dado que uma rede balanceada enfrenta melhor eventuais contingências. O balanceamento pode se dar entre todos os alimentadores da rede de distribuição ou em algum em particular, onde exista a necessidade de transferir carga de um determinado alimentador para os demais por questões operativas, manutenções ou para restauração de serviço de uma área “fora de serviço”.

Para evitar sobrecargas, resultante da variação de demandas, é desejável executar o balanceamento de carga entre os alimentadores do sistema de distribuição. Em condições normais de operação, o balanceamento de carga entre os alimentadores é obtido através da reconfiguração da rede, que redistribui as cargas entre os alimentadores. Com cargas mais balanceadas, o risco de sobrecarga pode ser reduzido (Hsu et al., 1993).

Operações de chaveamento nos alimentadores da rede de distribuição são executadas em situações anormais, como sobrecargas, desbalanceamento, desligamentos inesperados e durante a manutenção ou expansão do sistema, onde equipamentos devem ser desligados por um período. Estas situações podem causar desenergizações no sistema de distribuição, e as áreas desenergizadas devem ser isoladas e a restauração do serviço deve ser executada.

Nos algoritmos propostos para resolver o problema de reconfiguração de rede para transferência de cargas objetiva-se o balanceamento de carga, considerando restrições de limites de capacidade dos transformadores/alimentadores das subestações, limites do fluxo nas linhas, limites na queda de tensão nas barras de carga e radialidade da rede.

A Tabela 2.1 identifica a nomenclatura utilizada na formulação do problema definido na equações de (2.7) a (2.17). Como é preciso considerar o fluxo de potência nas arestas da rede em ambos os sentidos, utilizou-se a aresta fictícia, cujo sentido do fluxo é sempre inverso ao convencional.

As unidades das grandezas como tensão, corrente, potência e impedância, são descritas em p.u., ou por unidade. O valor por-unidade de qualquer quantidade é definido como a relação da quantidade pelo valor de uma base pré-definida, expressa como um decimal (Stevenson, 1986).

Grafo da Rede	
A	Conjunto de arestas da rede
N	Conjunto de nós da rede
n_a	Número de arestas da rede
Variáveis	
X_k	Indica se a chave normalmente fechada da aresta k está fechada ($X_k = 1$) ou aberta ($X_k = 0$) após o balanceamento de carga.
X'_k	Indica se a chave normalmente fechada da aresta fictícia k está fechada ($X'_k = 1$) ou aberta ($X'_k = 0$) após o balanceamento de carga.
Y_k	Indica se a chave normalmente aberta da aresta k está fechada ($Y_k = 1$) ou aberta ($Y_k = 0$) após o balanceamento de carga.
Y'_k	Indica se a chave normalmente aberta da aresta fictícia k está fechada ($Y'_k = 1$) ou aberta ($Y'_k = 0$) após o balanceamento de carga.
Referente aos nós	
F	Conjunto de nós fontes da rede
N_f	Conjunto de nós pertencentes a um alimentador f
C_j	Demanda, ou potência, do nó j
G_j	Potência disponível no nó j
V_j	Tensão no nó j
Referente às arestas	
S_k	Fluxo de Potência Complexa na aresta k
S'_k	Fluxo de Potência Complexa na aresta fictícia k
S_k^{max}	Capacidade Máxima de Fluxo de Potência Complexa da aresta k
L_j	Conjunto de todas as arestas cujos nós iniciais são o nó j
T_j	Conjunto de todas as arestas cujos nós terminais são o nó j
IL_k	Limite de fluxo de potência na aresta k
IL'_k	Limite de fluxo de potência na aresta fictícia k
Referente às chaves	
NF	Conjunto de todas as chaves normalmente fechadas
NA	Conjunto de todas as chaves normalmente abertas
Outros	
V^{min}	Tensão mínima aceitável
V^{max}	Tensão máxima aceitável
LB_{SYS}	Índice de balanceamento de carga do sistema

Tabela 2.1: Nomenclatura.

Função Objetivo:

$$\text{Min } LB_{SYS} = \frac{1}{n_a} \sum_{k \in NF} \frac{S_k}{S_k^{max}} (X_k + X'_k) + \frac{1}{n_a} \sum_{k \in NA} \frac{S_k}{S_k^{max}} (Y_k + Y'_k) \quad (2.7)$$

Sujeito a:

Restrições de limite de quedas de tensão nos nós:

$$|V_j^{min}| \leq |V_j| \leq |V_j^{max}|, \quad \forall j \in N \quad (2.8)$$

Restrições de limite de fluxo de corrente nas arestas:

$$S_k - IL_k X_k \leq 0, \quad \forall k \in A \quad (2.9)$$

$$S'_k - IL_k X'_k \leq 0, \quad \forall k \in A \quad (2.10)$$

$$S_k - IL_k Y_k \leq 0, \quad \forall k \in A \quad (2.11)$$

$$S'_k - IL_k Y'_k \leq 0, \quad \forall k \in A \quad (2.12)$$

$$S_k \geq 0 \quad (2.13)$$

$$S'_k \geq 0 \quad (2.14)$$

Restrições de balanço entre oferta e consumo:

$$\sum_{k \in T_j} (S_k + S'_k) - \sum_{k \in L_j} (S_k + S'_k) = C_j, \quad \forall j \in N \quad (2.15)$$

Restrições de capacidade de alimentadores:

$$\sum_{k \in N_j} S_k = G_j, \quad \forall j \in F \quad (2.16)$$

Restrições de radialidade da rede:

$$\sum_{k \in L_j} X_k + X'_k + Y_k + Y'_k \leq 1, \quad \forall j \in N \quad (2.17)$$

Restrições para que seja utilizada apenas uma aresta entre dois nós:

$$(X_k + X'_k) \leq 1, \quad \forall k \in A \quad (2.18)$$

$$(Y_k + Y'_k) \leq 1, \quad \forall k \in A \quad (2.19)$$

O objetivo é otimizar o índice de balanceamento do arco, dado pela equação (2.20), que mede o quanto um arco pode ser carregado sem exceder a respectiva capacidade máxima. O

índice de balanceamento do arco é aproximadamente igual para todos os arcos e conseqüentemente para o sistema, como mostra a equação (2.21). Portanto, o modelo apresentado tem como objetivo minimizar o índice de carga média do sistema de distribuição, dado pela equação (2.7).

$$LB_k = \frac{S_i}{S_i^{max}}(X_k + X'_k + Y_k + Y'_k) \quad \forall k \in A \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} \frac{S_1}{S_1^{max}}(X_1 + X'_1 + Y_1 + Y'_1) &\cong \frac{S_2}{S_2^{max}}(X_2 + X'_2 + Y_2 + Y'_2) \cong \dots \cong \frac{S_n}{S_n^{max}}(X_n + X'_n + Y_n + Y'_n) \\ &\cong \frac{1}{n_a} \sum_{k \in NF} \frac{S_k}{S_k^{max}}(X_k + X'_k) + \frac{1}{n_a} \sum_{k \in NA} \frac{S_k}{S_k^{max}}(Y_k + Y'_k) \quad \forall k \in A \end{aligned} \quad (2.21)$$

As variáveis de decisão do problema expressam a condição de cada chave disponível (X_k , X'_k , Y_k e Y'_k). Com a definição de todas as chaves do sistema, o fluxo de carga determina o fluxo de potência nas arestas da rede, possibilitando a avaliação da violação ou não das restrições (2.8 - 2.19).

O conjunto de restrições definido pela equação (2.8) garante que a queda de tensão em todos os nós estejam entre os limites mínimo e máximo estabelecidos.

As restrições (2.9-2.12) não permitem que seja excedida a capacidade de fluxo nos condutores da rede, evitando desligamentos na rede. As restrições (2.13 e 2.14) garantem a não negatividade do fluxo de potência complexo.

A conservação do fluxo de potência nos nós da rede é garantida pelas restrições especificadas pela equação (2.15).

A equação (2.16) refere-se à capacidade dos alimentadores. Estas restrições definem o limite máximo possível de carga a transferir.

As restrições (2.17) garantem que o sistema de distribuição opere radialmente. A restrição parte do pressuposto de que não deve haver mais de uma chave fechada incidente em um nó da rede, garantindo, assim, a inexistência de malhas.

A última condição dada pelas equações (2.18) e (2.19) que garantem que haverá somente um sentido de fluxo para cada arco da rede. Devido a criação do arco fictício garante-se a possibilidade de fluxo em ambos os sentidos da aresta, porém o fluxo deve ser no sentido convencional (X_k e Y_k) ou contrário (X'_k e Y'_k).

O modelo matemático apresentado nesta seção servirá como base teórica para o desenvolvimento dos métodos propostos. Os algoritmos desenvolvidos para o problema serão

baseados no objetivo e restrições propostos neste modelo.

Capítulo 3

Modelagem Computacional

Neste capítulo descreve-se a modelagem computacional em detalhes (Garcia, 2005). A complexidade inerente ao sistema de distribuição de energia elétrica sugere a consideração de todos os aspectos práticos de tal modo a se aproximar ao máximo das condições reais desse sistema. A mudança no paradigma de programação com a tecnologia dos objetos dá origem à programação orientada a objetos, metodologia escolhida neste trabalho.

Modelar orientado a objeto é uma nova maneira de pensar sobre problemas usando os modelos organizados, em torno dos conceitos do mundo real (Rumbaugh et al., 1991). C++ foi a linguagem computacional escolhida, por ser orientada a objetos e por ser eficiente e bastante flexível (Stroustrup, 1997).

As seções a seguir apresentam a estrutura geral do sistema (Seção 3.1) e as estruturas de dados empregadas (Seção 3.2).

3.1 Aspectos da Implementação da Estrutura de Classes

A UML (*Unified Modeling Language*) é uma linguagem para modelagem de dados orientados a objetos. Com ela é possível desenvolver uma modelagem visual de maneira que os relacionamentos entre os componentes do sistema sejam melhor visualizados e compreendidos e documentados (Booch et al., 1999).

O diagrama de classes do sistema computacional desenvolvido apresenta-se na Figura 3.1 e exhibe o conjunto de classes juntamente com seus relacionamentos e abrange uma visão estática da estrutura do sistema.

- Associação: representa um relacionamento entre classes e fornece a semântica comum e a estrutura para muitos tipos de “conexões” entre objetos. Associações são o mecanismo que permite aos objetos se comunicarem entre si. Elas descrevem a conexão entre diferentes classes (a conexão entre os objetos atuais é chamada conexão do objeto, ou *link*). Normalmente ela é bidirecional, o que significa que eles se influenciam mutuamente.

O conjunto de classes apresentado na Figura 3.1 está subdividido em cinco subconjuntos: algoritmos, entrada e saída, estruturas de dados auxiliares, instância e solução. Cada um desses subconjuntos, também chamados de pacotes, relaciona uma coleção de classes com características semelhantes, permitindo mais um nível de modularização do sistema.

A seguir descreve-se apenas os pacotes nos quais foram incluídas ou especializadas as classes para os algoritmos desenvolvidos nesta dissertação. A descrição completa pode ser encontrada em Garcia (2005).

3.1.1 Módulo Instância

Neste pacote estão reunidas todas as classes relativas à Instância do problema de balanceamento de carga e restauração de serviço. Elas correspondem a um relacionamento de agregação, ou seja, as classes Aresta, Vértice, Cabo, e Setor são parte da classe Instância, que por sua vez possui uma classe especializada Instância Balanceamento. A classe "Instância balanceamento" foi criada para particularizar os dados necessários aos algoritmos de balanceamento desenvolvidos nesta dissertação. Esta classe também compreende a representação do problema de balanceamento. Cabe salientar que foi considerada a representação de blocos de carga de um sistema de distribuição. Neles, todas as arestas incluídas são fixas (não são chaves) e portanto não causarão a alteração da topologia.

3.1.2 Módulo Solução

A resolução do problema de reconfiguração de rede para balanceamento de carga requer a representação adequada de uma possível solução, a partir da representação do problema incluída no pacote Instância. Neste pacote estão incluídas todas as classes que viabilizam uma representação própria para a solução, além de outras para descrever os conjuntos de solução. Uma breve descrição de cada uma delas é dada a seguir:

- Solução: nesta classe estão incluídos todos os itens necessários para representar uma solução para o problema de reconfiguração de redes. Estes itens se referem a todos os fatores elétricos decorrentes da solução representada.
- Solução Balanceamento: nesta classe é particularizada a representação de uma solução, com a inclusão de outros dados necessários especificamente ao problema de balanceamento de carga.

Especificamente quanto aos relacionamentos, observa-se que há um entre a solução e a respectiva instância do problema.

3.1.3 Módulo Algoritmo

Neste pacote estão incluídas as classes que compõem o método de resolução do problema de reconfiguração. Também faz parte deste pacote uma classe auxiliar que realiza os cálculos elétricos das soluções criadas: a classe Fluxo de Carga. Segue uma breve descrição de cada uma dessas classes.

- Fluxo de Carga: realiza o cálculo do fluxo de potência, com o emprego do *backward-forward-sweep method*, descrito na Seção 2.2.
- Algoritmo Construtivo: esta classe inclui o algoritmo que cria as soluções iniciais.
- Busca Gulosa: nesta classe estão incluídos os métodos que formam a busca gulosa do método proposto.

3.2 Aspectos da Implementação de Estruturas de Dados

A escolha da representação tem muita influência no desempenho do algoritmo proposto. Tanto a armazenagem quanto a utilização da estrutura desenvolvida influenciarão o tempo de execução.

A seguir são descritas as estruturas de dados utilizadas para representar a instância do problema (seção 3.2.1) e para a solução (seção 3.2.2).

3.2.1 Estrutura de dados para a Instância

Uma instância para o problema de balanceamento de carga é tão somente uma rede de distribuição primária. A representação empregada é baseada no modelo de grafo (Ahuja et al., 1993) em razão da abstração intuitiva e pela disponibilidade de algoritmos eficientes para manipulá-lo.

Um grafo é um conjunto de pontos, chamados de vértices (nós), interligados por linhas, chamadas de arestas (arcos), juntamente com os custos e capacidades associados aos vértices e as arestas. O modelo adotado para representar os grafos abordam estes dados da instância.

O grafo de uma rede de distribuição é um grafo não orientado, porque um cabo pode ter fluxo de potência em ambos os sentidos. A Figura 3.2 mostra um grafo de uma rede de distribuição composta por onze vértices (representado pelos círculos e numerados conforme numeração interna ao círculo) e doze arestas (representado por linhas contínuas ou por linhas tracejadas). Os vértices representam os blocos de carga ou subestações e as arestas representam os cabos entre dois vértices ou os dispositivos seccionadores no estado “fechado”, no caso de linhas contínuas, ou representam os dispositivos seccionadores no estado “aberto”, através de linhas descontínuas.

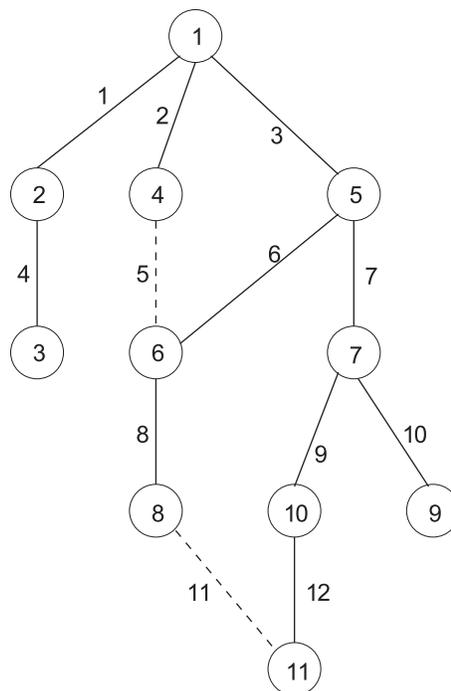


Figura 3.2: Modelo de grafo para rede de distribuição.

A Tabela 3.1 apresenta duas listas, uma para armazenar os vértices e outra para armazenar as arestas. A partir destas listas serão armazenadas as propriedades destes dois elementos fundamentais dos grafos (vértices e arestas).

Lista de Vértices

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Lista de Arestas

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

Tabela 3.1: Lista de Vértices e Arestas do grafo da Figura 3.2.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0
2		4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3			0	0	0	0	0	0	0	0	0
4				0	5	0	0	0	0	0	0
5						6	7	0	0	0	0
6							0	8	0	0	0
7								0	10	9	0
8									0	0	11
9										0	0
10											12
11											

Figura 3.3: Matriz adjacência vértice-vértice para o grafo da Figura 3.2.

Para representar a conexão entre dois vértices, utilizou-se a matriz adjacência vértice-vértice (Ahuja et al., 1993), somente com a diagonal superior. Embora esta representação não seja muito eficiente quanto ao espaço gasto, a associação imediata entre dois vértices favorece as operações, relativas à instância, que são executadas com mais frequência. A Figura 3.3 mostra a matriz adjacência vértice-vértice para o grafo da Figura 3.2. A matriz é formada por

uma coluna e a linha que corresponde aos vértices. Para a coluna i e linha j tem-se o índice da aresta que conecta os dois vértices ou o valor 0, caso não exista aresta entre os dois vértices.

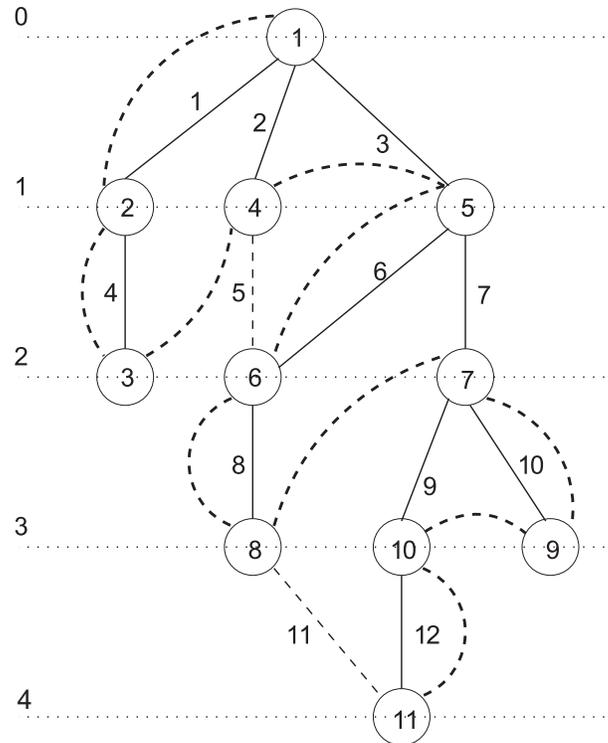
3.2.2 Estrutura de dados para a Solução

Uma solução para o problema de reconfiguração do serviço para o problema de balanceamento de carga corresponde a uma árvore.

A Figura 3.4 apresenta um exemplo de solução com a sua respectiva representação na estrutura de dados desenvolvida. A descrição das listas referenciadas na estrutura é a seguinte (Ahuja et al., 1993):

- $P(j)$: apontador para o próximo vértice quando a árvore é percorrida em pré-ordem;
- $V(j)$: apontador para o vértice pai;
- $N(j)$: indica o nível de profundidade do vértice j ;
- $A(j)$: indica o número da árvore na qual o vértice está incluído;
- $R(a)$: indica o vértice raiz da árvore a .

Nas quatro listas para os vértices, apresentadas na Figura 3.4, são mantidas as estruturas da árvore da solução. Outra lista, $R(a)$, fornece o vértice raiz da árvore.



(a) Grafo.

	Nós										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
P(j)	2	3	4	5	6	8	7	9	10	11	0
V(j)	0	1	2	1	1	5	5	6	7	7	10
N(j)	0	1	2	1	1	2	2	3	3	3	4
A(j)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Árvores										
R(a)	1										

(b) Estrutura de dados.

Figura 3.4: Grafo e estrutura de dados para a solução.

Capítulo 4

Algoritmos Propostos para Transferência de Carga

Neste capítulo é apresentado o conceito de Classificação de Chaves e Multi-Chaveamento, bem como um método de balanceamento de carga *Distance Measurement Technique (DMT)* usados na construção dos algoritmos adotados nesta dissertação.

4.1 Otimização Combinatória

Os problemas de otimização (Papadimitriou e Steiglitz, 1982) podem ser de minimização ou de maximização. Em ambos os casos, tem-se uma função aplicada a um domínio finito, que em geral é enumerável. De forma geral, um problema de otimização combinatória tem a seguinte forma:

$$\text{Minimizar} \quad f(x) \tag{4.1}$$

$$\text{sujeito a :} \quad x \in S \tag{4.2}$$

onde x é uma solução que pertence ao conjunto de soluções S . f mapeia S para \mathbb{R} , e expressa o valor da função objetivo para a solução x .

Muitos dos problemas combinatórios são intratáveis (Garey e Johnson, 1979), ou seja, são problemas para os quais não existe algoritmo que os resolvam em tempo polinomial. Estes problemas pertencem à classe NP , formada pelos problemas para os quais não existe um algo-

ritmo que resolva todas as instâncias de forma ótima em que o número de computações cresça polinomialmente em função do tamanho da instância. A classe P é formada pelos problemas de decisão que podem ser resolvidos por um algoritmo (determinístico) em tempo polinomial.

Pode-se formular, a partir de um problema “complexo” computacionalmente, três tipos de problemas:

- Problema de Decisão: consiste na verificação (decisão) da veracidade ou não de determinada questão para o problema (resposta SIM ou NÃO) - verificação da existência de determinada solução.
- Problema de Localização: consiste na verificação da existência e identificação (localização) de uma solução (segundo algum critério) para o problema.
- Problema de Otimização: consiste na verificação da existência e identificação da melhor (otimização) solução possível, dentro as soluções factíveis para o problema.

A definição destes três tipos de problemas foi feita de tal forma a ser bem caracterizada a relação entre os mesmos, ou seja, um problema de otimização possui embutido um problema de localização que por sua vez possui embutido um problema de decisão. Desta forma, se um problema de decisão é intratável, também serão suas versões de localização e de otimização.

A classe NP -completo são problemas NP que possuem a característica de que se um deles puder ser resolvido em tempo polinomial então todo problema NP -Completo terá uma solução em tempo polinomial (Cook, 1971).

Técnicas de solução incluem os métodos exatos e os aproximados. Costuma-se dividir os métodos de otimização em famílias: programação linear (Bazaraa et al., 1990), programação inteira (Newhauser e Wolsey, 1999) e programação não-linear (Bazaraa et al., 1993), por exemplo. Programação linear é utilizada para analisar modelos onde as restrições e a função objetivo são lineares; programação inteira se aplica a modelos que possuem variáveis inteiras (ou discretas); finalmente, programação não-linear é utilizada em modelos contendo funções ou restrições não-lineares.

Os métodos aproximados incluem heurísticas, metaheurísticas e métodos especiais. Define-se heurística como sendo uma técnica que procura boas soluções a um custo computacional razoável, sem, no entanto, estar capacitada a garantir a otimalidade, bem como garantir quão

próxima uma determinada solução está da solução ótima. A grande desvantagem das heurísticas reside na dificuldade de fugir de ótimos locais, o que deu origem à outra metodologia chamada de metaheurística, que possuem ferramentas que possibilitam sair destes ótimos locais, permitindo a busca em regiões mais promissoras. O grande desafio é produzir, em tempo mínimo, soluções tão próximas quanto possíveis da solução ótima.

Dentre as metaheurísticas que surgiram ao longo das últimas décadas, destacam-se: Algoritmos Genéticos (AGs) (Michalewicz, 1996), *Simulated Annealing* (Aarts e Korst, 1989), Busca Tabu (BT) (Glover e Laguna, 1997), entre outras. Dentre os métodos especiais destacam-se: Lógica *Fuzzy* (Pedrycz e Gomide, 1998), Redes Neurais, entre outros. Dentre as heurísticas, destacam-se: Algoritmos Gulosos (*Greedy*) (Cormen et al., 2002), Algoritmos de Construção, entre outros.

4.1.1 Algoritmo Guloso

Os métodos gulosos se baseiam no incremento da solução a cada passo, em que o elemento a incluir é determinado por uma função a que se dá o nome de função heurística.

As heurísticas gulosas, por serem construtivas, em geral criam soluções de qualidade muito superior à média das soluções aleatórias. O principal problema desta estratégia é que quando uma decisão é tomada, nunca é alterada. Isto conduz, por um lado, a que más decisões no início do processo não possam ser corrigidas. Por outro lado, a diversidade de soluções geradas é muito pequena, ainda que se utilizem diversas funções heurísticas para conduzir a procura.

Existem dois elementos que indicam que a estratégia gulosa pode ser utilizada com sucesso:

- Propriedade de Escolha Gulosa: uma solução ótima global pode ser obtida a partir de escolhas locais ótimas.
- Sub-estrutura ótima: um problema possui a propriedade de sub-estrutura ótima se uma solução ótima é composta por soluções ótimas para sub-problemas.

Os algoritmos desenvolvidos neste trabalho utilizam-se do algoritmo guloso/busca gulosa para encontrar a solução que minimiza a função heurística (função objetivo).

4.2 Índice de Classificação de Chaves

No problema formulado, é necessário estabelecer critérios para determinar, entre as chaves da rede, quais sofrerão manobras. Para isto, nesta seção, dois índices são apresentados: Capacidade Ociosa (*Spare Capacity*) e Carga Transferível (*Transferable Load*) (Miu et al. (1998), Miu et al. (2000)). Esses índices são a base para a classificação em um método de busca das chaves da rede. Os dados utilizados para determinar os índices são valores obtidos pelo fluxo de carga, apresentado na Seção 2.2.

O primeiro índice é uma medida de capacidade de fluxo livre. O fluxo de carga calcula o fluxo em cada ramo k , dado por I_k . Para cada ramo, entre a subestação e a chave normalmente aberta, I_k é comparado com a capacidade máxima, I_k^{max} , como mostra a equação 4.3.

$$I_M = \min (I_k^{max} - I_k), \quad \forall k \in F \quad (4.3)$$

A mínima diferença I_M entre todos os ramos no caminho é a máxima capacidade das chaves. F é o nó fonte da rede.

O segundo índice é a carga transferível para uma chave normalmente fechada. É definido como a quantidade de carga que cada chave normalmente fechada pode transferir para uma chave normalmente aberta, respeitando a capacidade da mesma. I_{SS} é computado como a soma de todas as cargas abaixo da chave normalmente fechada conforme a equação 4.4. O conjunto C_d é formado por todas as cargas abaixo da chave normalmente fechada.

$$I_{SS} = \sum_{C_d} I_L \quad (4.4)$$

4.3 Técnica de Medida da Distância

Em busca de uma solução para o problema matemático apresentado na Seção 2.3, alterações na topologia da rede serão executadas através de manobras de chaveamento guiadas por uma metodologia chamada *distance measurement technique (DMT)*, baseada no algoritmo de Kashem et al. (1999). Este algoritmo tem duas etapas fundamentais: na primeira encontra-se o ciclo que proporciona o maior balanceamento entre os alimentadores do sistema de distribuição

segundo o índice ΔLB , que considera o nível médio de carregamento destes alimentadores. Na segunda etapa é escolhida a chave, para interromper o ciclo determinado na etapa anterior, que promova o maior balanceamento de carga dos alimentadores envolvidos, segundo o índice ΔDC . Este índice é obtido através da representação da potência ativa e reativa de cada ramo m envolvido no ciclo. Com esta representação planar (plano PxQ) pretende-se escolher aquela chave que promova o maior balanceamento de carga a partir da relação entre a carga transferida e o fluxo de carga resultante: aquela chave m com o menor ΔDC_{tm} será escolhida (Kashem et al. (1999)).

Em uma rede radial diversos ciclos podem ser formados fechando-se as chaves normalmente abertas da rede. O número de ciclos é igual ao número de chaves normalmente abertas. A Figura 4.1 ilustra um ciclo criado através do fechamento da chave t .

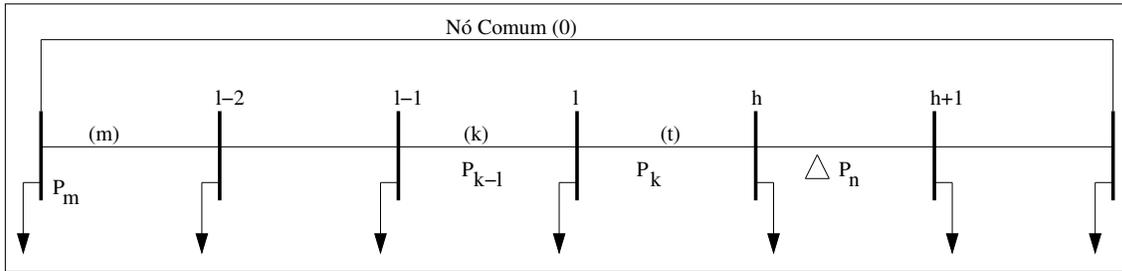


Figura 4.1: Ciclo associado à chave normalmente aberta t .

Pela abertura da chave t , divide-se o ciclo em duas partes: a primeira é formada pelos ramos do nó 0 ao l , e a segunda do nó 0 ao h . Considere a troca de ramos entre t e m , onde t é a chave normalmente aberta e m é a chave normalmente fechada. A mudança no balanceamento de carga devido a troca de ramos $t - m$ é dada pela equação 4.5 (Kashem et al. (1999), Baran e Wu (1989)).

$$\Delta LB_{tm}^S = 2P_m \left(\sum_{l \in F_o} k_l P_l - \sum_{h \in F_d} k_h P_h \right) + 2Q_m \left(\sum_{l \in F_o} k_l Q_l - \sum_{h \in F_d} k_h Q_h \right) - (P_m^2 + Q_m^2) k_{loop} \quad (4.5)$$

onde F_o representa o alimentador origem, ou seja, o alimentador que transferirá a carga e F_d representa o alimentador destino que receberá a carga a ser transferida. m é o ramo a ser removido, l representa o ramo pertencente a F_o e h representa o ramo pertencente a F_d . P_m e Q_m são o fluxo ativo e reativo, respectivamente, no ramo m (a ser removido), P_l e P_h são o fluxo ativo nos ramos l e h , respectivamente. k_l é o inverso do quadrado da capacidade máxima

do ramo l , k_h é o inverso do quadrado da capacidade máxima do ramo h , k_{loop} é a soma dos valores de k para cada ramo no ciclo em que exista fluxo de potência.

Se o valor de ΔLB_{tm}^S é maior que zero o balanceamento de carga é melhorado, caso contrário o balanceamento de carga é deteriorado.

Determinação do ciclo com Máximo Balanceamento de Carga

Nesta técnica, a distância de vários pontos (P_m, Q_m) para o centro do círculo do ciclo (P_o, Q_o) é calculada. O círculo do ciclo é desenhado através da relação entre o balanceamento de carga ΔLB_{tm}^S e a potência transferida (P_m, Q_m) como ilustra a Figura 4.2. Dado um ramo k , como mostra a Figura 4.1, se o valor de ΔLB_{tk}^S é negativo, então não há ramo no ciclo candidato à troca de ramos. Se o valor de ΔLB_{tk}^S é positivo, há um ramo candidato a troca de ramos e este ramo melhora o valor de ΔLB_{tm}^S .

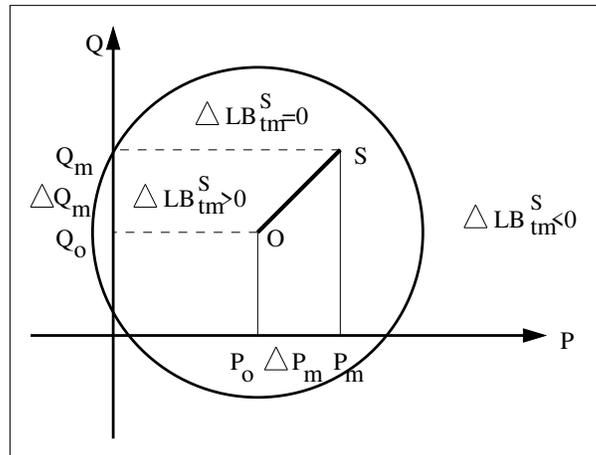


Figura 4.2: Círculo do ciclo de Balanceamento de Carga nulo.

Vários círculos podem ser desenhados para todos os ciclos do sistema e o maior círculo dará o máximo balanceamento de carga entre todos os círculos desenhados para os ciclos da rede.

Determinação da opção de chaveamento para o balanceamento de carga

Depois de determinar o ciclo que dá o máximo de balanceamento de carga, distâncias de vários pontos (P_m, Q_m) para o centro do círculo do ciclo são calculadas para encontrar o ramo a ser trocado para o máximo melhoramento. A menor distância é considerada melhor para o

máximo balanceamento de carga e é escolhida como candidata para a troca correspondente do ramo com a chave normalmente aberta.

O círculo da Figura 4.2 é chamado círculo do ciclo do balanceamento de carga nulo. A distância do ponto $S(P_m, Q_m)$ para o centro do círculo $O(P_o, Q_o)$ é dada pela equação 4.6.

$$\Delta DC_{tm} = \sqrt{\Delta P_m^2 + \Delta Q_m^2} \quad (4.6)$$

onde $\Delta P_m = P_m - P_o$ e $\Delta Q_m = Q_m - Q_o$.

Como descrito, somente o ponto do centro do círculo pode maximizar o balanceamento de carga do ciclo, ou seja, o mínimo valor de ΔDC_{tm} representa o máximo valor de balanceamento de carga.

4.4 Multi-Chaveamento

Muitas vezes o problema de reconfiguração da rede é considerado para o caso no qual há a necessidade de transferir carga de um determinado alimentador para os seus adjacentes por questões operativas ou até mesmo para facilitar uma eventual manutenção. Neste caso, é verificado se os alimentadores vizinhos, podem suprir a capacidade das cargas a serem transferidas. Caso os alimentadores adjacentes não suportem a transferência da carga desejada, utiliza-se o multi-chaveamento.

A troca de ramos é executada através do fechamento de uma chave normalmente aberta, chave faca, e da abertura de uma chave normalmente fechada, chave seccionadora, para manter a estrutura radial da rede.

O Multi-Chaveamento (Miu et al., 2000) é então executado a partir de um alimentador origem escolhido, no qual o alívio de carga é desejado, até que sejam analisados todos os alimentadores ou a carga desejada tenha sido transferida. Considere os seguintes *tier* (níveis, ou camadas de chaveamento):

- *Tier 1*: chaves facas incidentes no alimentador origem.
- *Tier 2*: chaves facas incidentes ao *Tier 1*.
- *Tier n*: chaves facas incidentes no *Tier n - 1*.

Se a capacidade do *Tier* 1 não é suficiente para aliviar a carga do alimentador origem, altos *Tiers* são considerados, ou seja, *Tier* 2 ... *Tier* n . As chaves do *Tier* 2 transferem cargas do *Tier* 1 para o *Tier* 2, aumentando a capacidade do *Tier* 1 e possibilitando, então, o alívio de carga do alimentador origem. O processo é repetido até que seja executado o último *Tier* ou a capacidade desejada seja “liberada” para o *Tier* 1, para que possa ser executada a transferência de carga do alimentador origem.

4.5 Algoritmos Desenvolvidos

Nesta seção serão detalhados os algoritmos implementados para o problema de reconfiguração de rede de distribuição primária objetivando o balanceamento de carga entre os alimentadores. O balanceamento pode se estender a todos os alimentadores da rede de distribuição ou em um caso particular, no qual há a necessidade de transferir carga de um determinado alimentador para outros, por questões operativas, manutenções ou para restauração de serviço de uma área “fora de serviço”. O chaveamento pode acontecer em um nível, ou seja, entre o alimentador origem e seu adjacentes ou em vários níveis, multi-chaveamento. A seguir, serão apresentados alguns conceitos utilizados pelos algoritmos propostos:

- Alimentador Origem: corresponde ao alimentador no qual se deseja transferir carga.
- Alimentador Adjacente: corresponde ao alimentador que está conectado ao alimentador origem por uma chave normalmente aberta.
- Alimentador Destino: corresponde ao alimentador que receberá a carga, total ou parcial, a ser transferida.
- Nó Fonte: corresponde ao nó pertencente ao alimentador origem com alguma interligação com outro alimentador.
- Ciclo: corresponde à malha formada pelo fechamento de uma chave aberta entre dois alimentadores.
- *Área Clara*: corresponde ao conjunto de consumidores que não teve interrupção no fornecimento de energia.

- *Área Escura*: corresponde ao conjunto de consumidores que ficou sem energia após o isolamento do defeito, ou seja, a área “fora de serviço”.
- *Fronteira*: corresponde a um nó fonte pertencente ao alimentador origem, que não pode ser transferido. Esta fronteira, por exemplo, pode estabelecer a conexão com uma *área escura*. Por isso deseja-se o alívio do alimentador ao qual ela pertence.
- *Vetor Alimentador*: corresponde ao vetor composto pelo conjunto de alimentadores no qual se deseja transferir carga.
- *Vetor Alimentador Analisado*: corresponde ao vetor composto pelo conjunto de alimentadores pertencente ao Vetor Alimentador a cada iteração, ou seja, corresponde a todos os alimentadores no qual foi desejada a transferência de carga.
- *Vetor Alimentador Adjacente*: corresponde ao vetor de alimentadores que está conectado ao alimentador origem, ou ao Vetor Alimentador, por uma chave normalmente aberta.

Pode-se tratar o problema impondo a transferência de carga de forma a minimizar o desbalanceamento, de forma simples ou utilizando o multi-chaveamento. Também pode-se considerar uma fronteira a ser preservada no alimentador origem. Os métodos propostos são:

- Algoritmo de Balanceamento de Carga Irrestrito (ABCI) - utiliza-se do algoritmo apresentado no trabalho de Kashem et al. (1999).
- Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito (ABCR) - utiliza-se do algoritmo apresentado no trabalho de Kashem et al. (1999), especificando um único alimentador para o balanceamento.
- Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito com Fronteira (ABCRF) - utiliza-se do algoritmo apresentado no trabalho de Kashem et al. (1999), especificando um único alimentador para o balanceamento preservando o nó fronteira.
- Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado (ABCRM) - utiliza-se do algoritmo ABCR, forçando o alívio de carga de um alimentador.
- Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado com Fronteira (ABCRMF) - utiliza-se do algoritmo ABCRM preservando o nó fronteira.

- Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado *Multi-Tier* (ABCRMMT) - utiliza-se do algoritmo ABCRM em vários níveis, como no trabalho de Miu et al. (2000).
- Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado *Multi-Tier* com Fronteira (ABCRMMTF) - utiliza-se do algoritmo ABCRMMT preservando o nó fronteira.

4.5.1 Algoritmo de Balanceamento de Carga Irrestrito (ABCI)

O Algoritmo de Balanceamento de Carga Irrestrito tem como objetivo minimizar o índice de balanceamento do sistema de distribuição (Kashem et al., 1999), respeitando as condições mínimas de operação tais como radialidade, quedas de tensões, limites dos fluxos nas linhas e a capacidade dos alimentadores.

A Figura 4.3 apresenta o algoritmo proposto nesta seção. Este algoritmo é baseado no método de Kashem et al. (1999), chamado de *distance measurement technique (DMT)*, apresentado na Seção 4.3.

1. Calcular o fluxo de carga para obter o fluxo de potência em todos os ramos da rede.
2. Calcular o índice ΔLB para todos os ciclos do sistema.
3. Se não houver ΔLB positivo, pare. Caso contrário, vá para o passo 4.
4. Identificar o maior valor de ΔLB e selecione o ciclo que lhe deu origem.
5. Para o ciclo selecionado, calcular o valor de P_o e Q_o .
6. Calcular a distância geométrica (ΔDC) entre os valores de P_m e Q_m e P_o e Q_o para todas as possibilidades de chaves.
7. Classificar as chaves em ordem não decrescente do valor de ΔDC .
8. Escolher a chave com menor ΔDC factível. Se todas as restrições forem satisfeitas, execute a manobra da chave e vá para o passo 1. Se não, exclua o ΔLB que deu origem ao ciclo escolhido e vá para o passo 4.

Figura 4.3: Algoritmo de Balanceamento de Carga Irrestrito (ABCI).

Verifica-se na Figura 4.3 que no passo 4 se encerra a primeira etapa, na qual é determinado o ciclo com o melhor índice ΔLB . Entre os passos 5-8 é escolhida a chave que deve ser aberta para interromper o ciclo escolhido na etapa anterior, o que corresponde a segunda e última etapa do algoritmo. O critério de parada é incluído no passo 3, determinando que a partir de uma certa configuração não haverá manobras que promovam índices ΔLB positivos. O fluxo de carga é calculado a cada manobra executada para que os fluxos de potência nos ramos sejam atualizados. Nestes casos, o fluxo de carga é atualizado para os ramos que sofreram

modificações, os ramos do alimentador origem e do alimentador destino.

4.5.2 Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito (ABCR)

O Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito tem como objetivo minimizar o índice de balanceamento do sistema de distribuição (Kashem et al., 1999), respeitando as condições mínimas de operação tais como radialidade, quedas de tensões, limites dos fluxos nas linhas e a capacidade dos alimentadores.

Neste caso, considera-se um problema específico de transferência de carga onde pode-se selecionar apenas os ciclos que envolvam o alimentador origem (aquele do qual se quer retirar carga). Assim, considera-se o balanceamento de carga proporcionado quando se analisam os demais alimentadores, excetuando esse alimentador origem.

A Figura 4.4 apresenta o algoritmo proposto nesta seção. Este algoritmo também é baseado no método (*DMT*).

1. Calcular o fluxo de carga para obter o fluxo de potência em todos os ramos da rede.
2. Calcular o índice ΔLB para todos os ciclos entre o alimentador origem e os alimentadores adjacentes.
3. Se não houver ΔLB positivo ou se a capacidade desejada foi transferida, pare. Caso contrário, vá para o passo 4.
4. Identificar o maior valor de ΔLB e selecione o ciclo que lhe deu origem.
5. Para o ciclo selecionado, calcular o valor de P_o e Q_o .
6. Calcular a distância geométrica (ΔDC) entre os valores de P_m e Q_m e P_o e Q_o para todas as possibilidades de chaves.
7. Classificar as chaves em ordem não decrescente do valor de ΔDC .
8. Escolher a chave com menor ΔDC factível. Se todas as restrições forem satisfeitas, execute a manobra da chave e vá para o passo 1. Se não, exclua o ΔLB que deu origem ao ciclo escolhido e vá para o passo 4.

Figura 4.4: Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito (ABCR).

Verifica-se, na Figura 4.4, que no passo 4 se encerra a primeira etapa, na qual é determinado o ciclo com o melhor índice ΔLB . Verifica-se que, no passo 2, os ciclos considerados são aqueles entre o alimentador origem e os alimentadores adjacentes. Entre os passos 5-8 é escolhida a chave que deve ser aberta para interromper o ciclo escolhido na etapa anterior, o que corresponde à segunda e última etapa do algoritmo.

O critério de parada é incluído no passo 3, determinando que a partir de uma certa configuração não haverá manobras que promovam índices ΔLB positivos, ou que, a partir de uma

certa configuração, a capacidade de carga transferida seja suficiente, conforme um $\Delta Carga$ desejado. O fluxo de carga é calculado a cada manobra executada para que os fluxos de potência nos ramos sejam atualizados.

4.5.3 Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito com Fronteira (AB-CRF)

O Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito com Fronteira tem como objetivo minimizar o índice de balanceamento do sistema de distribuição (Kashem et al., 1999), respeitando as condições mínimas de operação tais como radialidade, quedas de tensões, limites dos fluxos nas linhas e a capacidade dos alimentadores. O nó fronteira corresponde a um nó fonte pertencente ao alimentador origem, que não pode ser transferido. Esta fronteira, por exemplo, pode estabelecer a conexão com uma *área escura*. Por isso deseja-se o alívio do alimentador ao qual ela pertence.

Este algoritmo baseia-se no Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito, diferindo-se apenas na preservação de uma fronteira do alimentador origem. A Figura 4.4 apresenta o algoritmo proposto nesta seção.

1. Calcular o fluxo de carga para obter o fluxo de potência em todos os ramos da rede.
2. Calcular o índice ΔLB para todos os ciclos entre o alimentador origem e os alimentadores adjacentes.
3. Se não houver ΔLB positivo ou se a capacidade desejada foi transferida, pare. Caso contrário, vá para o passo 4.
4. Identificar o maior valor de ΔLB e selecione o ciclo que lhe deu origem.
5. Para o ciclo selecionado, calcular o valor de P_o e Q_o .
6. Calcular a distância geométrica (ΔDC) entre os valores de P_m e Q_m e P_o e Q_o para todas as possibilidades de chaves.
7. Classificar as chaves em ordem não decrescente do valor de ΔDC .
8. Escolher a chave com menor ΔDC factível.
9. Se a chave escolhida exclui fronteira, exclua a chave e vá para o passo 8.
10. Se todas as restrições forem satisfeitas, execute a manobra da chave e vá para o passo 1. Se não, exclua o ΔLB que deu origem ao ciclo escolhido e vá para o passo 4.

Figura 4.5: Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito com Fronteira (ABCRF).

Verifica-se, através da Figura 4.5, que as modificações feitas em relação à Figura 4.4 restringem-se à observância das fronteiras. No passo 9 é avaliado se a chave escolhida exclui a

fronteira do alimentador origem, caso seja verdadeiro esta opção de chaveamento é excluída e uma nova chave é selecionada.

Esta alteração exemplifica bem o caso de restauração de serviço. Neste caso, deseje-se o alívio de um dado alimentador por uma determinada fronteira de um $\Delta Carga$ desejado. A restauração de serviço pode ser feita posteriormente a esta transferência de carga, de forma que uma *área escura*, com um $\Delta Carga$ conhecido, seja interligada pela fronteira escolhida do alimentador origem.

4.5.4 Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado (AB-CRM)

O Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado tem como objetivo transferir um $\Delta Carga$ desejado de forma a minimizar o índice de balanceamento do sistema de distribuição (Kashem et al., 1999), respeitando as condições mínimas de operação tais como radialidade, quedas de tensões, limites dos fluxos nas linhas e a capacidade dos alimentadores.

Neste algoritmo, busca-se a transferência de carga selecionando apenas os ciclos que envolvam o alimentador origem (aquele do qual se quer retirar carga). Com isso, o balanceamento de carga é aquele proporcionado quando são considerados os demais alimentadores, excetuando esse alimentador origem.

A Figura 4.6 apresenta o algoritmo proposto nesta seção. Nota-se que no passo 4 se encerra a primeira etapa, na qual é determinado o ciclo com o melhor índice ΔLB . No passo 2 verifica-se que os ciclos considerados são aqueles entre o alimentador origem e os alimentadores adjacentes. No passo 5 é calculado o índice Capacidade Ociosa para o alimentador destino, ou seja, para o alimentador que receberá um $\Delta Carga$. Para que isto ocorra é necessário estimar qual a capacidade de carga suportada por este alimentador destino, o que significa saber qual a capacidade limite, sejam elas: capacidade do transformador, capacidade do alimentador, capacidade das linhas e das chaves.

No passo 6 é escolhida a chave que deve ser aberta para interromper o ciclo escolhido na etapa anterior. Esta escolha se dá utilizando o índice Carga Transferível, que quantifica o quanto será transferido devido à escolha de uma determinada chave para ser aberta.

O critério de parada é incluído no passo 3, determinando que a partir de uma certa

1. Calcular o fluxo de carga para obter o fluxo de potência em todos os ramos da rede.
2. Calcular o índice ΔLB para todos os ciclos entre o alimentador origem e os alimentadores adjacentes.
3. Se não houver ΔLB positivo ou se a capacidade desejada foi transferida, pare. Caso contrário, vá para o passo 4.
4. Identificar o maior valor de ΔLB e selecione o ciclo que lhe deu origem.
5. Analisar I_M do alimentador destino.
6. Escolher a chave para abrir, cujo valor de $I_{ss} \leq I_M$.
7. Se todas as restrições forem satisfeitas, execute a manobra da chave e vá para o passo 1. Se não, exclua o ΔLB que deu origem ao ciclo escolhido e vá para o passo 4.

Figura 4.6: Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado (ABCRM).

configuração não haverá manobras que promovam índices ΔLB positivos, ou que, a partir de uma certa configuração, a capacidade de carga transferida seja suficiente segundo um $\Delta Carga$ desejado. O fluxo de carga é calculado a cada manobra executada para que os fluxos de potência nos ramos sejam atualizados.

4.5.5 Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado com Fronteira (ABCRMF)

O Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado com Fronteira tem como objetivo transferir um $\Delta Carga$ desejado de uma determinada fronteira de forma a minimizar o índice de balanceamento do sistema de distribuição (Kashem et al., 1999), respeitando as condições mínimas de operação tais como radialidade, quedas de tensões, limites dos fluxos nas linhas e a capacidade dos alimentadores.

Este algoritmo, conforme a Figura 4.7, baseia-se no Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado diferindo-se apenas na manutenção da fronteira do alimentador origem.

A modificação feita em relação à Figura 4.6 encontra-se no passo 7, onde é verificado se a chave escolhida exclui a fronteira do alimentador origem determinada. Em caso afirmativo, uma nova chave é selecionada.

1. Calcular o fluxo de carga para obter o fluxo de potência em todos os ramos da rede.
2. Calcular o índice ΔLB para todos os ciclos entre o alimentador origem e os alimentadores adjacentes.
3. Se não houver ΔLB positivo ou se a capacidade desejada foi transferida, pare. Caso contrário, vá para o passo 4.
4. Identificar o maior valor de ΔLB e selecione o ciclo que lhe deu origem.
5. Analisar I_M do alimentador destino.
6. Escolher a chave para abrir, cujo valor de $I_{ss} \leq I_M$.
7. Se a chave escolhida exclui fronteira, exclua a chave e vá para o passo 6.
8. Se todas as restrições forem satisfeitas, execute a manobra da chave e vá para o passo 1. Se não, exclua o ΔLB que deu origem ao ciclo escolhido e vá para o passo 4.

Figura 4.7: Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado com Fronteira (AB-CRMF).

4.5.6 Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado *Multi-Tier* (ABCRMMT)

O Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado *Multi-Tier* tem como objetivo transferir um $\Delta Carga$ desejado de forma a minimizar o índice de balanceamento do sistema de distribuição (Kashem et al., 1999), respeitando as condições mínimas de operação tais como radialidade, quedas de tensões, limites dos fluxos nas linhas e a capacidade dos alimentadores.

Neste algoritmo considera-se o balanceamento de carga proporcionado quando todos os alimentadores são considerados exceto o alimentador origem. A Função Auxiliar, conforme Figura 4.8, apresenta o método base utilizado para determinar o ciclo, com o melhor índice ΔLB e identificar a chave a ser aberta que interrompa o ciclo.

No passo 2 nota-se que os ciclos devem ser entre os alimentadores do Vetor Alimentador e os alimentadores adjacentes, que não pertençam ao Vetor Alimentador Analisado. A Tabela 4.1 mostra que para *Tier* 0 tem-se o alimentador origem, os adjacentes (a e b) e o alimentador que foi analisado (o alimentador origem). Para *Tier* 1 o Vetor Alimentador, “alimentador origem”, será composto pelo Vetor Alimentador Adjacente do *Tier* 0, o adjacente destes alimentadores formarão o Vetor Alimentador Adjacente e o Vetor Alimentador Analisado será atualizado incluindo os novos alimentadores “origem”.

No passo 5 é calculado o índice Capacidade Ociosa para o alimentador destino, ou seja,

1. Calcular o fluxo de carga para obter o fluxo de potência em todos os ramos da rede.
2. Calcular o índice ΔLB para todos os ciclos entre os alimentadores do Vetor Alimentador e os alimentadores adjacentes, que não pertençam ao Vetor Alimentador Analisado.
3. Se não houver ΔLB positivo ou se a capacidade desejada foi transferida, pare. Caso contrário, vá para o passo 4.
4. Identificar o maior valor de ΔLB e selecione o ciclo que lhe deu origem.
5. Analisar I_M do alimentador destino.
6. Escolher a chave para abrir, cujo valor de $I_{ss} \leq I_M$.
7. Se todas as restrições forem satisfeitas, execute a manobra da chave e vá para o passo 1. Se não, exclua o ΔLB que deu origem ao ciclo escolhido e vá para o passo 4.

Figura 4.8: Função Auxiliar.

	Tier 0	Tier 1	Tier2
Vetor Alimentador	[origem]	[a, b]	[c, d, e]
Vetor Alimentador Adjacente	[a, b]	[c, d, e]	[...]
Vetor Alimentador Analisado	[origem]	[origem, a, b]	[origem, a, b, c, d, e]

Tabela 4.1: Estrutura de Alimentadores para o *Multi-Tier*.

para o alimentador que receberá um $\Delta Carga$. No passo 6 é escolhida a chave que deve ser aberta para interromper o ciclo escolhido na etapa anterior, utilizando o índice Carga Transferível.

O critério de parada é incluído no passo 3, determinando que a partir de uma certa configuração não haverá manobras que promovam índices ΔLB positivos, ou que, a partir de uma certa configuração, a capacidade de carga transferida seja suficiente. Deseja-se obter um alívio $\Delta Carga$ no alimentador origem, e, conseqüentemente, para os alimentadores de mais alto *Tier*. O fluxo de carga é calculado a cada manobra executada para que os fluxos de potência nos ramos sejam atualizados.

A Figura 4.9 apresenta o algoritmo ABCRMMT. Os passos 1-2 executam o algoritmo da Figura 4.8 para o alimentador origem, ou seja, o alimentador em que se deseja obter um alívio de carga.

Os passos de 3-6 executam a “subida” para os *Tiers* mais altos. São três critérios de parada: (1) o alcance da capacidade desejada a ser transferida; (2) a inexistência de alimentadores a serem considerados; e (3) o *Tier* atual apresenta valor superior a 3. A capacidade desejada é

1. Executa o algoritmo Função Auxiliar para o alimentador origem.
2. Atualiza o Vetor Alimentador, Vetor Alimentador Analisado e o Vetor Alimentador Adjacente.
3. Se a capacidade desejada foi transferida ou se não há mais alimentadores a serem analisados ou se $Tier > 4$, vá para o passo 7.
4. Executa o algoritmo Função Auxiliar para o Vetor Alimentador.
5. Atualiza o Vetor Alimentador, Vetor Alimentador Analisado e o Vetor Alimentador Adjacente.
6. Incrementa Tier e vá para o passo 3.
7. Executa o algoritmo Função Auxiliar para o Vetor Alimentador da iteração Tier - 1, até Tier=0. Se Tier=0, vá para passo 10.
8. Atualiza o Vetor Alimentador, Vetor Alimentador Analisado e o Vetor Alimentador Adjacente.
9. Decrementa Tier e vá para o passo 7.
10. Se a variação de carga transferida for menor que uma tolerância ou se a capacidade desejada foi transferida, pare. Se não, vá para o passo 1.

Figura 4.9: Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado *Multi-Tier* (AB-CRMMT).

assumida como a diferença entre o valor desejado e o valor efetivamente obtido em outros *Tiers*.

Os passos de 7-9 executam novamente a “descida” até o *Tier* 0, fazendo assim um deslocamento da carga de *Tiers* mais baixos para os mais altos e aliviando conseqüentemente o alimentador origem.

O critério de parada final é incluído no passo 10, verificando se o alívio desejado no alimentador origem foi obtido ou se a variação de carga transferida a cada iteração é menor que uma dada tolerância. O fluxo de carga é calculado a cada rotina da Função Auxiliar a cada manobra executada para que os fluxos de potência nos ramos sejam atualizados. A Função Auxiliar é a função responsável pela operação de chaveamento, a cada rotina espera-se a transferência de cargas entre os *Tiers*.

4.5.7 Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado *Multi-Tier* com Fronteira (ABCRMMTF)

O Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado *Multi-Tier* com Fronteira é uma modificação do Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado *Multi-Tier* (ABCRMMT), onde deseja-se que uma fronteira do alimentador origem seja preservada.

O Algoritmo principal dado pela Figura 4.11 não sofre modificações. A Função Auxiliar, conforme Figura 4.10, procura preservar a fronteira do alimentador origem, diferenciando-se do ABCRMMT.

1. Calcular o fluxo de carga para obter o fluxo de potência em todos os ramos da rede.
2. Calcular o índice ΔLB para todos os ciclos entre os alimentadores do Vetor Alimentador e os alimentadores adjacentes, que não pertençam ao Vetor Alimentador Analisado.
3. Se não houver ΔLB positivo ou se a capacidade desejada foi transferida, pare. Caso contrário, vá para o passo 4.
4. Identificar o maior valor de ΔLB e selecione o ciclo que lhe deu origem.
5. Analisar I_M do alimentador destino.
6. Escolher a chave para abrir, cujo valor de $I_{SS} \leq I_M$.
7. Se a chave escolhida exclui fronteira, exclua a chave e vá para o passo 6.
8. Se todas as restrições forem satisfeitas, execute a manobra da chave e vá para o passo 1. Se não, exclua o ΔLB que deu origem ao ciclo escolhido e vá para o passo 4.

Figura 4.10: Função Auxiliar com Fronteira.

1. Executa o algoritmo Função Auxiliar para o alimentador origem.
2. Atualiza o Vetor Alimentador, Vetor Alimentador Analisado e o Vetor Alimentador Adjacente.
3. Se a capacidade desejada foi transferida ou se não há mais alimentadores a serem analisados ou se $Tier > 4$, vá para o passo 7.
4. Executa o algoritmo Função Auxiliar para o Vetor Alimentador.
5. Atualiza o Vetor Alimentador, Vetor Alimentador Analisado e o Vetor Alimentador Adjacente.
6. Incrementa Tier e vá para o passo 3.
7. Executa o algoritmo Função Auxiliar para o Vetor Alimentador da iteração Tier - 1, até Tier=0. Se Tier=0, vá para passo 10.
8. Atualiza o Vetor Alimentador, Vetor Alimentador Analisado e o Vetor Alimentador Adjacente.
9. Decrementa Tier e vá para o passo 7.
10. Se a variação de carga transferida for menor que uma tolerância ou se a capacidade desejada foi transferida, pare. Se não, vá para o passo 1.

Figura 4.11: Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado *Multi-Tier* com Fronteira (ABCRMMTF).

A modificação feita em relação à Figura 4.10 encontra-se no passo 7, onde é verificado se a chave determinada exclui a fronteira escolhida do alimentador origem. Em caso afirmativo, uma nova chave é selecionada.

Capítulo 5

Resultados Computacionais

Neste capítulo é apresentado um estudo de casos para avaliação dos algoritmos desenvolvidos. Primeiramente são apresentados os dados das redes utilizadas. Em seguida, na seção de resultados, são apresentados estudos com as diferentes implementações descritas no capítulo 4.

Primeiramente é importante relembrar algumas características do problema de reconfiguração de rede, já abordado. A reconfiguração de uma rede de distribuição de energia elétrica é a alteração da sua topologia realizada por meio de manobras de suas chaves. O balanceamento de carga é uma redistribuição de carga entre alimentadores obtida através da alteração do estado aberto/fechado das chaves do sistema de distribuição. A restauração do serviço é um tipo de reconfiguração da rede efetuada em condições anormais de operação, tipicamente quando uma parte dos consumidores apresentam interrupção no fornecimento de energia.

Para avaliar experimentalmente os algoritmos propostos foram utilizadas quatro redes de distribuição de diferentes dimensões, variando de pequenas, com algumas dezenas de chaves e barras de carga, até grandes, com algumas centenas de chaves e alguns milhares de barras de carga. A Tabela 5.1 apresenta as quatro redes: a rede 1 foi obtida do trabalho de (Baran e Wu, 1989), a rede 2 foi obtida do trabalho de (Augugliaro et al., 1998) e as outras duas redes são sistemas reais e foram obtidas de uma concessionária brasileira. Cada rede é caracterizada pelas informações sobre o número de subestações, nós, arcos, chaves, alimentadores, barras de carga e potência ativa total (kW). As Figuras 5.1- 5.4 ilustram as topologias da redes da Tabela 5.1.

Para todos os resultados é apresentado o valor inicial e final da função objetivo, LB_{SYS} , calculado com a função descrita na Seção 2.3. O valor de outra função, Capacidade Ociosa, que

	Redes de Distribuição			
	1	2	3	4
Número de Subestações	2	6	1	1
Número de Nós	36	92	1.057	2.645
Número de Arcos	42	115	1.078	2.680
Número de Chaves	42	115	63	262
Número de Alimentadores	2	7	3	11
Número de Barras	32	75	417	716
Potência Ativa Total (kW)	3.715	28.621	11.542	42.664

Tabela 5.1: Redes de distribuição empregadas nos testes computacionais.

avalia a capacidade reserva dos alimentadores é também calculada, conforme equação (5.1). Esta função expressa a relação entre a capacidade reserva de cada alimentador e a média da capacidade reserva de todos os alimentadores.

$$CO_{cap} = \sum_{i=1}^m (CO_i - CO_{med})^2 \quad (5.1)$$

O valor de CO_{CAP} será tanto maior quanto maior for a dispersão em torno de CO_{med} , portanto o melhor valor é o que se aproxima do valor nulo.

Para o caso de reconfiguração da rede com transferência de carga de um determinado alimentador (denominado alimentador origem) para os adjacentes, por questões operativas ou até mesmo para facilitar uma eventual manutenção, os valores de LB_{SYS} e CO_{CAP} são calculados desconsiderando o alimentador origem. Esta medida é adotada para que não aconteça uma interpretação errônea dos índices. Tanto o carregamento quanto a capacidade reserva do alimentador origem, após a transferência de carga, estarão destoantes dos outros alimentadores do sistema até que haja a conexão da área que se encontra “fora de serviço”.

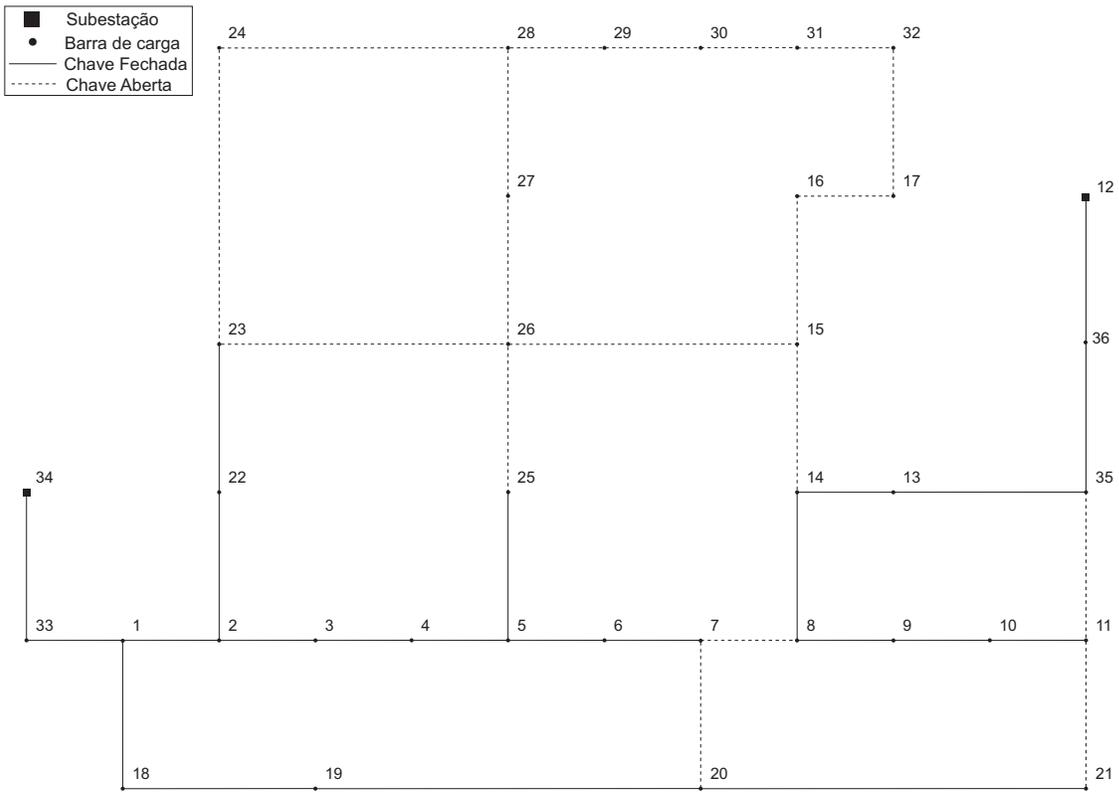


Figura 5.1: Topologia da rede de distribuição 1.

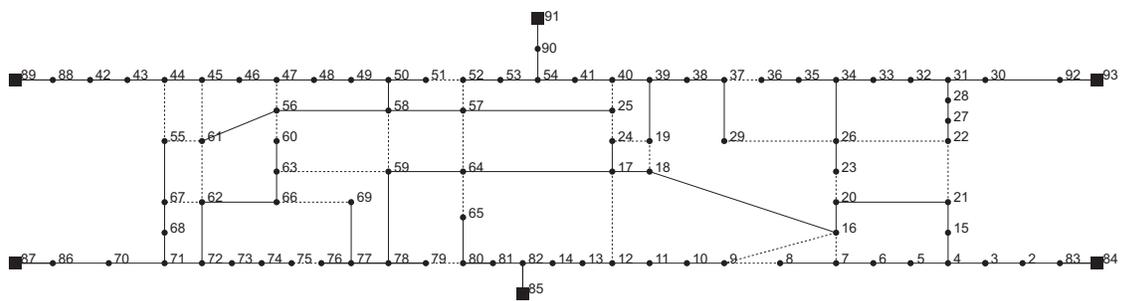


Figura 5.2: Topologia da rede de distribuição 2.



Figura 5.3: Topologia da rede de distribuição 3.

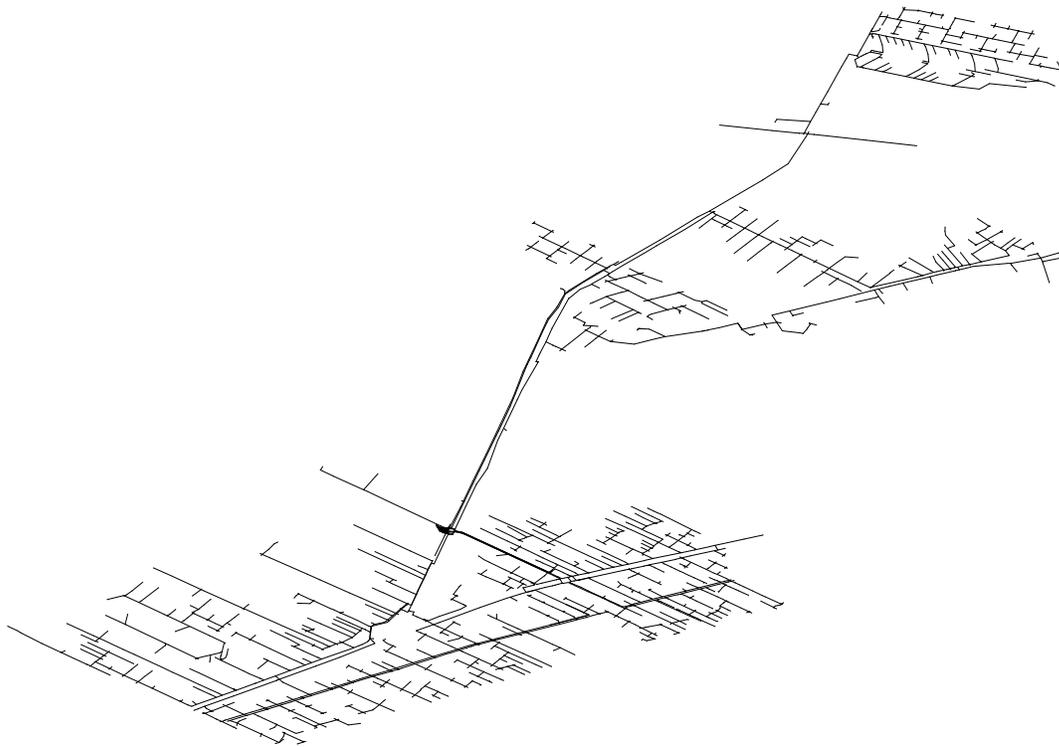


Figura 5.4: Topologia da rede de distribuição 4.

Vários testes foram feitos para avaliar a qualidade dos algoritmos propostos. Os tempos de execução apresentados nos testes foram medidos em um computador AMD Sempron 2800+ com 1.60 GHz, 512 Mbytes de memória RAM e sistema operacional Windows. O algoritmo foi desenvolvido na linguagem C++, utilizando-se o compilador Bloodshed Dev-C++ 4.9.9.2.

São apresentados estudos para :

- Algoritmo de Balanceamento de Carga Irrestrito (ABCI) - algoritmo apresentado no trabalho de Kashem et al. (1999).
- Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito (ABCR) - algoritmo apresentado no trabalho de Kashem et al. (1999), com a restrição de um único alimentador para balanceamento.
- Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito com Fronteira (ABCRF) - algoritmo apresentado no trabalho de Kashem et al. (1999), com a restrição de um único alimentador para balanceamento e a preservação do nó fronteira.
- Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado (ABCRM) - algoritmo ABCR para retirar carga de um dado alimentador.
- Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado com Fronteira (ABCRMF) - algoritmo ABCRM preservando o nó fronteira.
- Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado *Multi-Tier* (ABCRMMT) - algoritmo ABCRM em vários níveis, como no trabalho de (Miu et al., 2000).
- Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado *Multi-Tier* com Fronteira (ABCRMMTF) - algoritmo ABCRMMT preservando o nó fronteira.

Pode-se afirmar que os estudos acerca das características da rede sugeriram valores para $\Delta Carga$ desejado. A Tabela 5.2 apresenta este parâmetro e os valores empregados, que evidenciam a contribuição do mesmo na eficiência do algoritmo. O valor de 0,006 pu para um $\Delta Carga$ equivale a aproximadamente três pontos de carga, variando de acordo com a rede utilizada.

Parâmetro	ABCMMT e ABCMMTF em Rede 4	Outras Simulações
$\Delta Carga$ (pu)	0,006	0,075

Tabela 5.2: Parâmetros utilizados nas aplicações dos algoritmos nas redes.

5.1 Resultados para o Algoritmo de Balanceamento de Carga Irrestrito

Esta seção inclui os resultados do ABCI para as quatro redes de distribuição da Tabela 5.1. Este algoritmo executa o balanceamento de carga entre todos os alimentadores, através da reconfiguração da rede.

Rede 1:

Nesta simulação foi feito o balanceamento de carga entre todos os alimentadores. O valor de $\Delta Carga$ para transferência utilizado nestas simulações é de 0,075 pu. O tempo gasto foi de 0,078 segundos. O valor inicial de $LB_{SYS} = 2,2180\%$ e $CO_{CAP} = 0,0158e-3$ pu. Os resultados encontram-se na Tabela 5.3.

Alimentadores (Origem-Destino)	Chaveamento (Fecha-Abre)	$\Delta Carga$ (pu)	LB_{SYS} (%)	CO_{CAP} (e-3 pu)
1-12	8-7	0,025	2,1860	0,4689
12-1	33-8	0,05	2,1860	0,1877

Tabela 5.3: Resultados da Aplicação de ABCI na Rede 1.

Pelos resultados da Tabela 5.3 verifica-se que na primeira iteração houve uma transferência de 0,025 pu de carga do alimentador 1 para o alimentador 12, através da manobra das chaves 8 e 7, cujo estado tornou-se fechado e aberto, respectivamente. Consecutivamente, houve a transferência de 0,05 pu do alimentador 12 para o 1, através da manobra de chaveamento das chaves 33 e 8, onde a chave 33 é fechada e a 8 é aberta. Pelo valor final de $LB_{SYS} = 2,1860\%$ e $CO_{CAP} = 0,1877e-3$ pu é possível concluir que houve uma melhora no balanceamento do

sistema e uma piora na capacidade reserva dos alimentadores do sistema.

Rede 2/Rede 3/Rede 4:

As redes 2, 3 e 4 não apresentaram manobras de chaveamento que melhorassem o balanceamento. É possível concluir que nestes casos a configuração atual é a mais adequada segundo as características técnicas e de acordo com as condições de demanda das cargas instaladas.

5.2 Resultado para o Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito

Esta seção inclui os resultados do ABCR para as quatro redes de distribuição da Tabela 5.1. O ABCR executa o balanceamento de carga entre o alimentador origem e seus adjacentes, através da reconfiguração da rede. O valor de $\Delta Carga$ para transferência utilizado nestas simulações é de 0,075 pu.

Rede 1:

A rede 1 realiza chaveamentos considerando como alimentador origem qualquer um dos dois alimentadores. E nos dois casos obteve-se redução de carga do alimentador, com o objetivo de melhorar o balanceamento de carga. O valor de LB_{SYS} inicial= 2,2180% e CO_{CAP} inicial= 0,0 pu. Os resultados das simulações encontram-se na Tabela 5.4.

Alimentador (Origem-Destino)	Chaveamento (Fecha-Abre)	$\Delta Carga$ (pu)	LB_{SYS} (%)	CO_{CAP} (pu)	Tempo (s)
1-12	8-7	0,025	2,1860	0,0	0,078
12-1	35-11	0,0075	2,2054	0,0	0,031

Tabela 5.4: Resultados da Aplicação de ABCR na Rede 1.

Para o caso em que o alimentador origem = 1, conforme verifica-se na Tabela 5.4, obteve-se uma transferência de carga de 0,025 pu para o alimentador 12, através das manobras 8-7 (fecha-abre). No caso do alimentador 12 como alimentador origem obteve-se transferência

de 0,0075 pu pelo chaveamento 35-11. Percebe-se que nos dois casos o valor final de LB_{SYS} é menor que o inicial, portanto houve uma melhora no balanceamento de carga do sistema. Esta rede possui dois alimentadores e excetuando o alimentador origem nos cálculos de CO_{CAP} , conforme equação (5.1), obtém-se um valor nulo, pois a média da capacidade reserva é dada pela capacidade reserva do outro alimentador. Os tempos para os dois casos são menores do que um décimo de segundo.

Rede 2/Rede 3/Rede 4:

As redes 2, 3 e 4 não apresentaram manobras de chaveamento que melhorassem o balanceamento. É possível concluir que nestes casos a configuração atual é a mais adequada segundo as características técnicas e de acordo com as condições de demanda das cargas instaladas.

5.3 Resultado para o Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito com Fronteira

Esta seção inclui os resultados do ABCRF para as quatro redes de distribuição da Tabela 5.1. O ABCRF executa o balanceamento de carga entre o alimentador origem e seus adjacentes, preservando uma fronteira escolhida, através da reconfiguração da rede. O valor de $\Delta Carga$ para transferência utilizado nestas simulações é de 0,075 pu.

Rede 1:

A rede 1 realizou chaveamentos para dois alimentadores. Para cada alimentador foram realizadas duas tentativas de redução de carga, modificando em cada caso a fronteira preservada. O valor de LB_{SYS} inicial= 2,2180% e CO_{CAP} inicial= 0,0 pu. Os resultados encontram-se na Tabela 5.5.

Analisando a Tabela 5.5 verifica-se que o valor inicial e final de CO_{CAP} são nulos. Por se tratar de uma rede com dois alimentadores, o valor de CO_{CAP} , dado pela equação (5.1), torna-se nulo pois a média da capacidade reserva é igual a capacidade reserva do alimentador adjacente ao origem.

Alimentador (Origem-Destino)	Fronteira	Chaveamento (Fecha-Abre)	$\Delta Carga$ (pu)	LB_{SYS} (%)	CO_{CAP} (pu)	Tempo (s)
1-12	21	8-7	0,025	2,1860	0,0	0,078
1-12	7	-	-	2,2180	0,0	0,051
12-1	8	35-11	0,0075	2,2054	0,0	0,234
12-1	11	-	-	2,2180	0,0	0,031

Tabela 5.5: Resultados da Aplicação de ABCRF na Rede 1.

Nota-se também que duas simulações foram feitas com o alimentador 1 como origem, uma preservando a fronteira 21 no primeiro caso e a fronteira 7 no segundo. A Figura 5.5 ilustra as fronteiras 7 e 21 do alimentador 1 para a rede de distribuição 1.

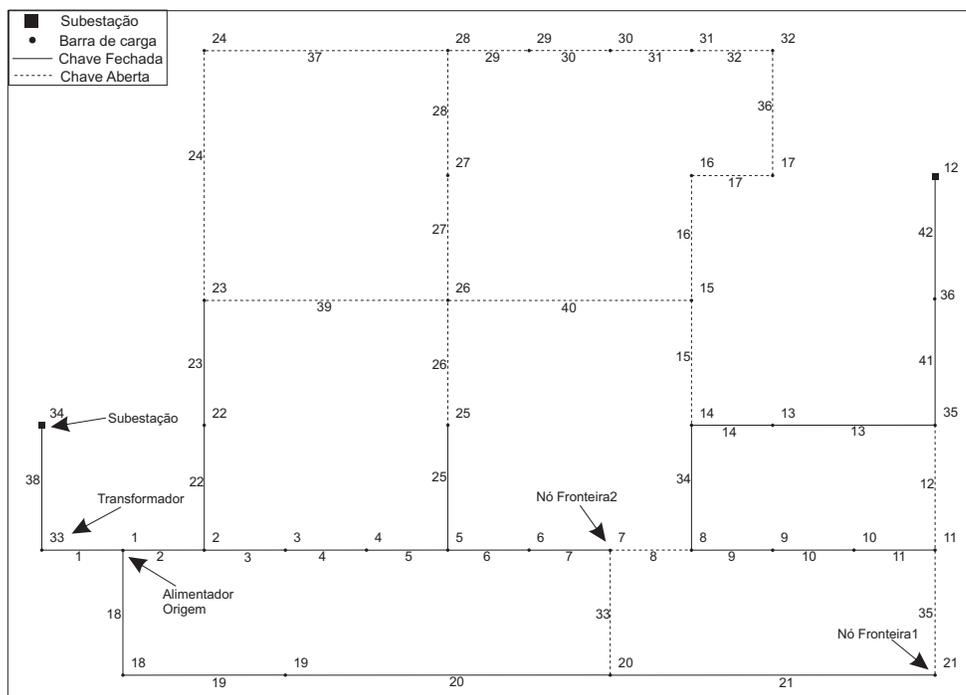


Figura 5.5: Fronteiras do alimentador 1 da rede de distribuição 1.

A Figura 5.6 ilustra a simulação feita preservando a fronteira 21. Percebe-se que através do chaveamento 8-7 obteve-se a transferência de um $\Delta Carga$ e a redução do índice LB_{SYS} , conseqüentemente o balanceamento do sistema. Para a outra fronteira não houve nenhum chaveamento que melhorasse o balanceamento de carga e preservasse a fronteira.

Pela Tabela 5.5 verifica-se que duas simulações foram feitas com o alimentador 12

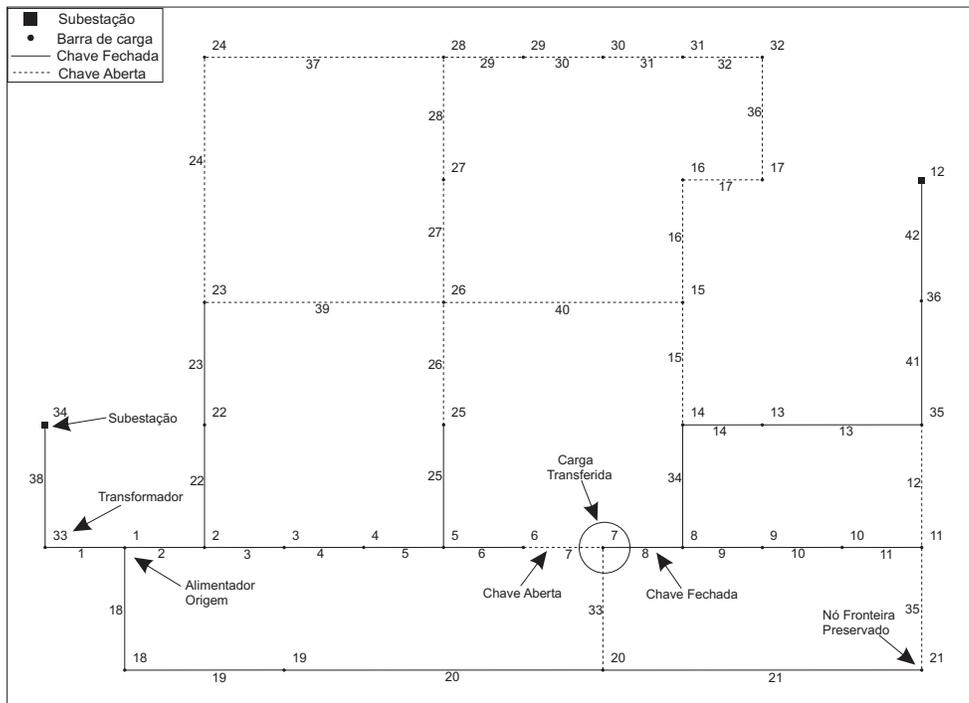


Figura 5.6: Chaveamento 8-7 do alimentador 1 da rede de distribuição 1.

como origem, uma preservando a fronteira 8 no primeiro caso e a fronteira 11 no segundo. A Figura 5.7 ilustram as fronteiras analisadas para o alimentador origem 12.

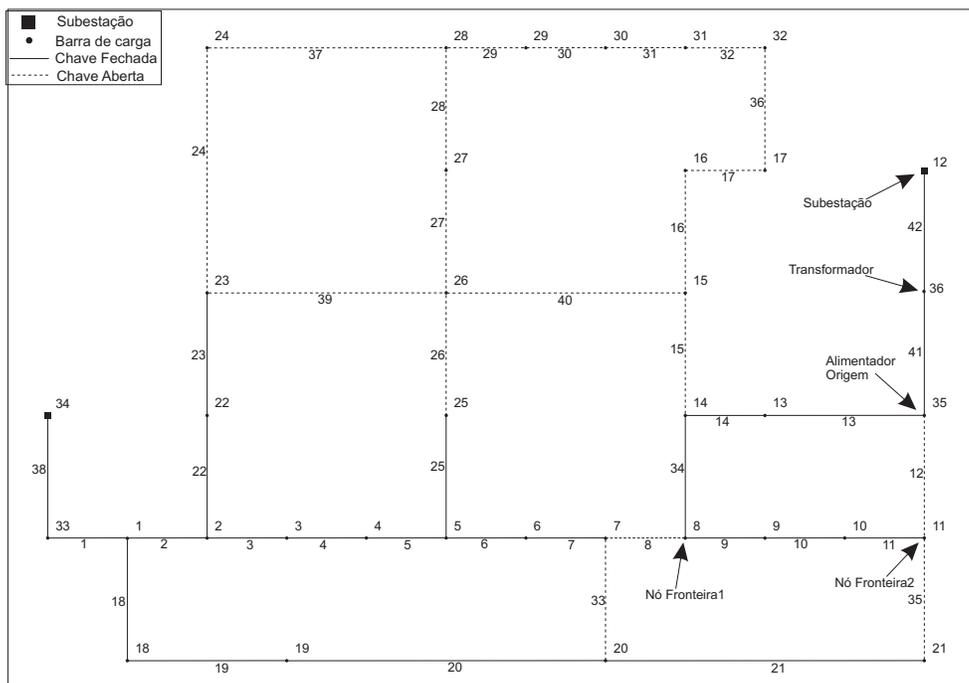


Figura 5.7: Fronteiras do alimentador 12 da rede de distribuição 1.

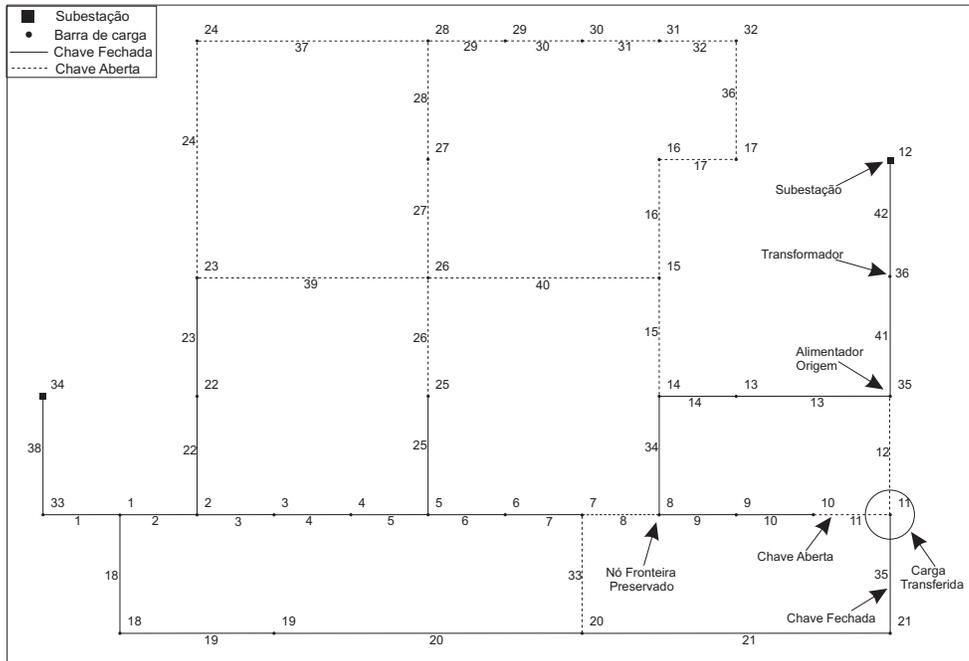


Figura 5.8: Chaveamento 35-11 do alimentador 2 da rede de distribuição 1.

Para o alimentador 12 preservando a fronteira 11 não se obteve solução que melhorasse o balanceamento. Para a fronteira 8 obteve-se uma transferência de carga de 0,0075 pu, através das manobras 33-11, como ilustra a Figura 5.8. Os tempos de simulação são inferiores a um segundo.

Rede 2/Rede 3/Rede 4:

As redes 2, 3 e 4 não apresentaram manobras de chaveamento que melhorassem o balanceamento.

5.4 Resultados para o Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado

Os resultados do ABCRM para as quatro redes de distribuição da Tabela 5.1 estão apresentados nesta seção. O algoritmo executa a transferência de um $\Delta Carga$, neste caso de 0,075 pu, entre o alimentador origem e seus adjacentes, de forma a minimizar o balanceamento de carga do sistema.

Rede 1:

As simulações foram feitas considerando os dois alimentadores individualmente como origem. A Tabela 5.6 apresenta os resultados das simulações.

Alimentador (Origem-Destino)	Chaveamento (Fecha-Abre)	$\Delta Carga$ (pu)	LB_{SYS} (%)		CO_{CAP} (pu)		Tempo (s)
			Inicial	Final	Inicial	Final	
1-12	8-13	0,0875	0,2776	0,6036	0,0	0,0	0,046
12-1	35-14	0,0356	3,1151	2,5223	0,0	0,0	0,031

Tabela 5.6: Resultados da Aplicação de ABCRM na Rede 1.

Pela Tabela 5.6 percebe-se que houve transferência de um $\Delta Carga$ nos dois casos. Para o alimentador 1 como origem, obteve-se a transferência de 0,0875 pu de carga, ou seja, transferiu-se a carga desejada. A transferência se deu pela manobra das chaves 8-13. Nota-se que o valor de LB_{SYS} final é maior do que o inicial, o que significa que na busca pela transferência do $\Delta Carga$ desejado, houve uma piora no índice de balanceamento de carga do sistema.

Para o alimentador 12 como origem, efetuaram-se as manobras 35-14 e conseguiu-se um $\Delta Carga$ de 0,0356 pu. O valor de $\Delta Carga$ foi menor do que o desejado e o valor de LB_{SYS} , neste caso, foi menor, mostrando que devido a esta transferência o sistema tornou-se melhor balanceado. Quanto aos tempos computacionais, as duas simulações gastaram menos de um segundo.

Nota-se que o valor inicial e final de CO_{CAP} são nulos. Como a rede 1 é formada por dois alimentadores, a média da capacidade reserva é igual a capacidade reserva do alimentador adjacente ao origem, anulando assim o valor de CO_{CAP} .

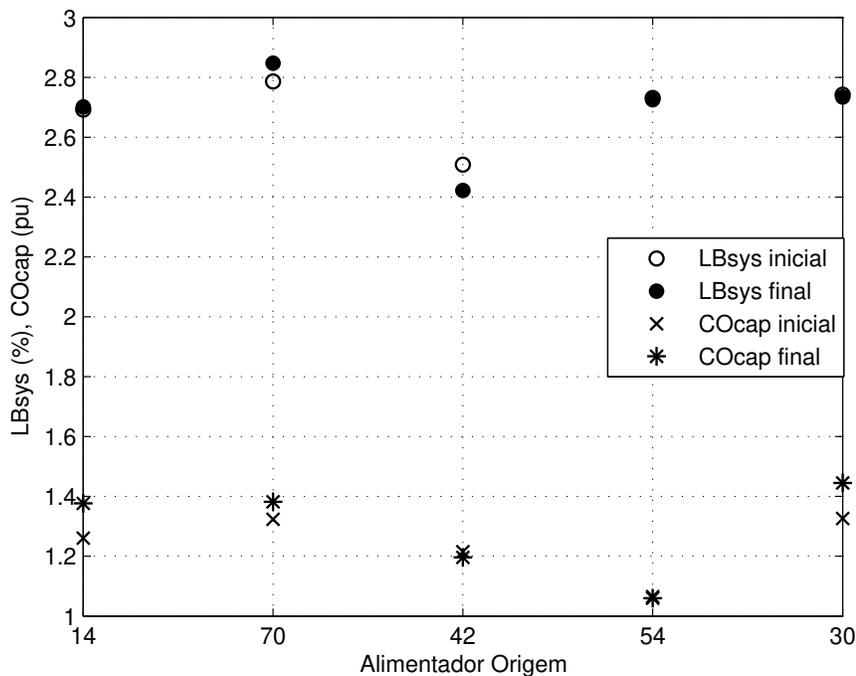
Rede 2:

Os resultados das simulações feitas para todos os alimentadores da Rede 2, encontram-se na Tabela 5.7.

Nota-se, a partir da Tabela 5.7, que para os alimentadores 14, 70, 42, 54 e 30 foram obtidos transferências de carga para um alimentador adjacente. O $\Delta Carga$ desejado, 0,075 pu, foi obtido em três casos.

Alimentador (Origem-Destino)	Chaveamento (Fecha-Abre)	$\Delta Carga$ (pu)	LB_{SYS} (%)		CO_{CAP} (pu)		Tempo (s)
			Inicial	Final	Inicial	Final	
14-2	18-17	0,0781	2,6922	2,7010	1,2606	1,3768	0,406
70-42	76-77	0,0855	2,7860	2,8470	1,3238	1,3823	0,062
42-2	82-81	0,0	2,5080	2,4221	1,2153	1,1966	0,093
54-30	42-46	0,0641	2,7309	2,7248	1,0655	1,0600	0,578
30-2	35-37	0,0773	2,7420	2,7344	1,3262	1,4450	0,296

Tabela 5.7: Resultados da Aplicação de ABCRM na Rede 2.

Figura 5.9: LB_{SYS} e CO_{CAP} inicial e final obtidas pela execução de ABCRM na rede de distribuição 2.

A Figura 5.9 apresenta graficamente os valores iniciais e finais de LB_{SYS} e CO_{CAP} para cada simulação. No 1º e 2º caso o valor de LB_{SYS} final e de CO_{CAP} final foi maior que os valores iniciais, ou seja, para que houvesse a transferência da carga desejada alterou-se a configuração inicial da rede, provocando um desbalanceamento mínimo no sistema. No 3º caso o valor de LB_{SYS} e de CO_{CAP} foi reduzido. Nota-se que o $\Delta Carga$ transferido foi nulo, portanto a justificativa desta redução se dá pelo fato de que o fluxo pelos arcos se reduz pela

transferência dos mesmos, ou seja, pela redução da impedância do cabo. No 4º caso houve redução nos índices e um $\Delta Carga$ transferido menor que o desejado. No 5º caso houve a transferência do $\Delta Carga$ desejado. O valor de LB_{SYS} é reduzido, mostrando que o sistema sofreu um balanceamento, já o valor de CO_{CAP} aumentou. Isso demonstra que algum alimentador está com um carregamento maior, distinguindo-se de uma média. O tempo computacional gasto foi inferior a um segundo.

Rede 3:

A Tabela 5.8 apresenta os resultados da aplicação do ABCRM para todos os alimentadores individualmente como origem da rede 3.

Alimentador (Origem-Destino)	Chaveamento (Fecha-Abre)	$\Delta Carga$ (pu)	LB_{SYS} (%)		CO_{CAP} (e-3 pu)		Tempo (s)
			Inicial	Final	Inicial	Final	
1012-1096	1036-1047	0,1627	3,9999	3,4503	2,51905	13,1374	0,875
1058-1096	1124-1094	0,1230	5,1325	5,0835	4,1510	4,1513	0,968

Tabela 5.8: Resultados da Aplicação de ABCRM na Rede 3.

A Tabela 5.8 mostra que os alimentadores 1012 e 1058 transferiram um $\Delta Carga$ superior ao desejado, conseguindo, assim, reduzir o carregamento do alimentador origem. O tempo necessário nestas simulações é menos de 1 segundo.

Pela Figura 5.10 nota-se que para o 1º caso o valor de LB_{SYS} foi reduzido, já o CO_{CAP} foi maior que o inicial, ou seja, o sistema se encontra balanceado, mais alguns alimentadores diferem dos outros na capacidade reserva. No 2º caso houve a transferência da carga, a redução do valor de LB_{SYS} e o CO_{CAP} manteve-se igual ao valor inicial.

Rede 4:

Para a rede 4, foram feitas simulações considerando todos os alimentadores individualmente como origem. Os resultados encontram-se na Tabela 5.9.

Pelos resultados da Tabela 5.9 nota-se que para todos os casos houve um $\Delta Carga$ transferido menor que o desejado. O tempo gasto é de aproximadamente 5 segundos, este aumento no tempo computacional é justificado pela rede ser de grande porte. A Figura 5.11

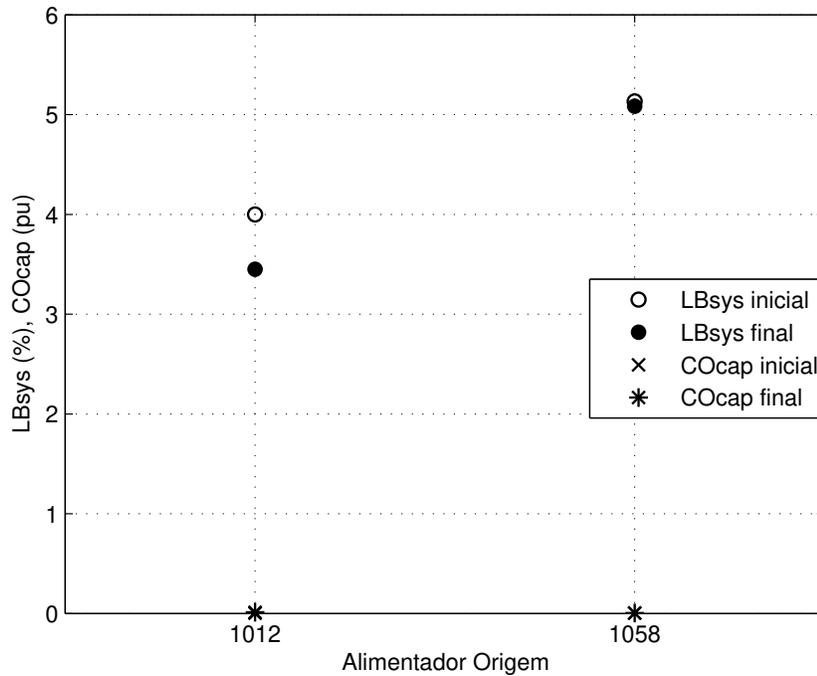


Figura 5.10: LB_{SYS} e CO_{CAP} inicial e final obtidas pela execução de ABCRM na rede de distribuição 3.

Alimentador (Origem-Destino)	Chaveamento (Fecha-Abre)	$\Delta Carga$ (pu)	LB_{SYS} (%)		CO_{CAP} (pu)		Tempo (s)
			Inicial	Final	Inicial	Final	
2404-2411	2408-2405	0,6666	11,6999	14,1153	1,4677	1,3572	5,046
2425-2600	2447-2426	0,3187	13,5691	12,9628	1,4394	1,3323	4,765
2544-2600	2530-2542	0,5316	13,4355	13,0364	1,4218	1,3322	4,953
2558-2600	2552-2555	0,1059	12,9153	12,9004	1,4191	1,3325	5,000
2624-2600	2602-2621	0,4072	13,2105	13,0022	1,3912	1,3322	4,906

Tabela 5.9: Resultados da Aplicação de ABCRM na Rede 4.

mostra que para o 1º caso houve um aumento do índice LB_{SYS} , conseqüentemente uma piora no balanceamento do sistema e uma redução do CO_{CAP} que explica uma piora, também, na capacidade de reserva do alimentador envolvido. No 2, 3º, 4º e 5º casos os índices LB_{SYS} e CO_{CAP} foram menor do que o valor inicial, o que mostra uma melhora no balanceamento do sistema e na capacidade de reserva dos alimentadores envolvidos.

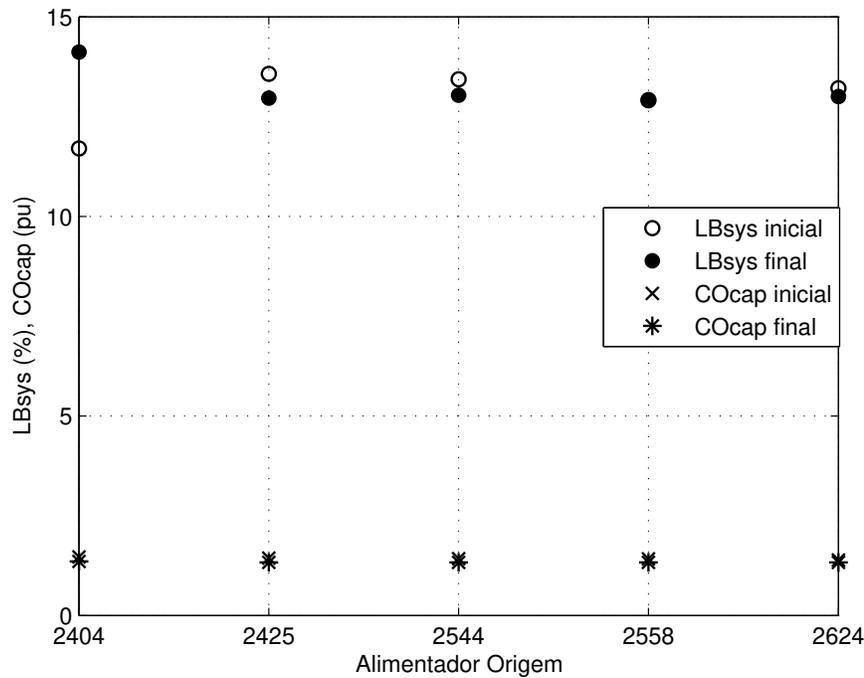


Figura 5.11: LB_{SYS} e CO_{CAP} inicial e final obtidas pela execução de ABCRM na rede de distribuição 4.

5.5 Resultado para o Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado com Fronteira

Esta seção inclui os resultados do ABCRMF para as quatro redes de distribuição da Tabela 5.1. O ABCRMF executa a transferência de um $\Delta Carga$ entre o alimentador origem e seus adjacentes, respeitando uma fronteira pré-definida, de forma a minimizar o balanceamento de carga do sistema. O valor de $\Delta Carga$ desejado para transferência é de 0,075 pu.

Rede 1:

A Tabela 5.10 mostra os resultados obtidos pela aplicação do ABCRMF na rede 1.

Pela Tabela 5.10 percebe-se que para os dois alimentadores consegue-se fazer simulações preservando o nó fronteira. O tempo de simulação para os dois casos são menores do que um segundo. No 1ª caso o $\Delta Carga$ transferido é maior que o almejado, o que explica o aumento do índice de balanceamento do sistema. No 2º caso houve a transferência, porém de

Alimentador (Origem-Destino)	Fronteira	Chaveamento (Fecha-Abre)	$\Delta Carga$ (pu)	LB_{SYS} (%)		CO_{CAP} (pu)		Tempo (s)
				Inicial	Final	Inicial	Final	
1-12	21	8-3	0,0875	0,2776	0,6036	0,0	0,0	0,031
12-1	8	35-9	0,0206	3,1151	2,7023	0,0	0,0	0,187

Tabela 5.10: Resultados da Aplicação de ABCRMF na Rede 1.

um valor menor que o desejado. Neste, a função objetivo: balanceamento de carga é minimizado. As Figuras 5.12 e 5.13 ilustram as cargas transferidas, a fronteira preservada para os alimentadores 1 e 12, respectivamente, da rede de distribuição 1.

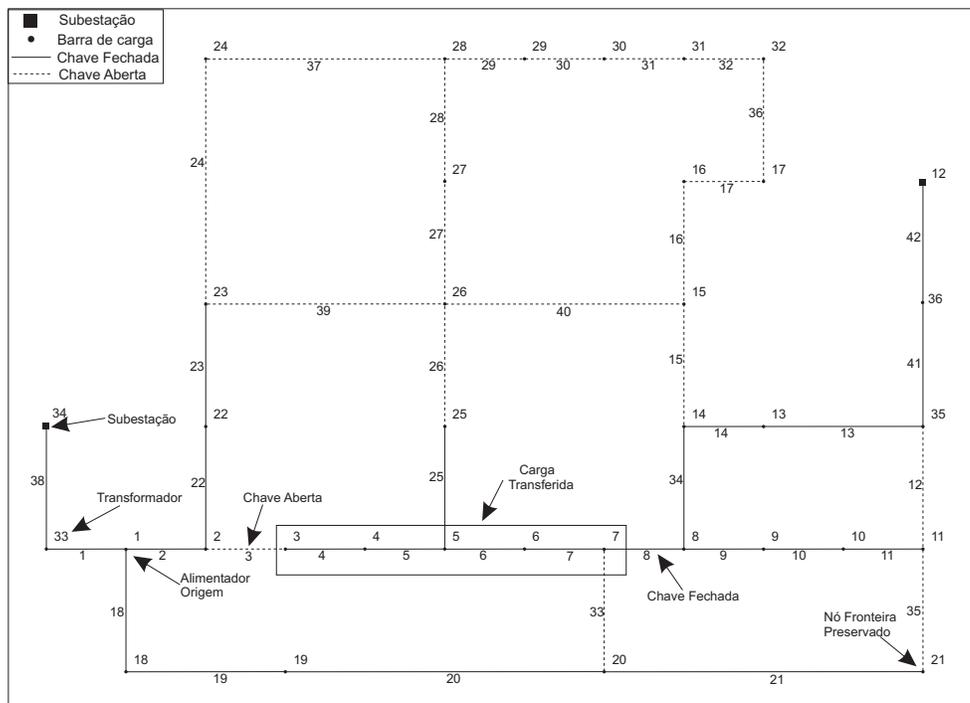


Figura 5.12: Chaveamento 8-3 do alimentador 1 da rede de distribuição 1.

Rede 2:

Para a rede 2, foram feitas simulações considerando todos os alimentadores individualmente como origem e para cada alimentador foram analisadas duas fronteiras. Os resultados encontram-se na Tabela 5.11.

Na Tabela 5.11 observa-se que não houve $\Delta Carga$ transferido em dois casos e em três casos o $\Delta Carga$ foi maior que o desejado. Para todas as instâncias da Tabela 5.11

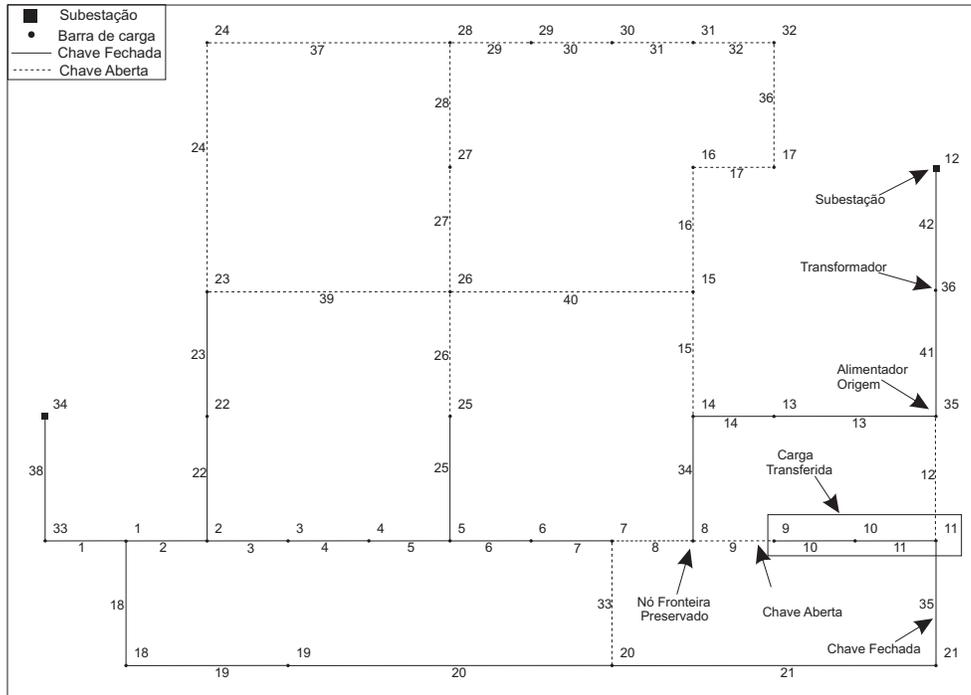


Figura 5.13: Chaveamento 35-9 do alimentador 12 da rede de distribuição 1.

Alimentador (Origem-Destino)	Fronteira	Chaveamento (Fecha-Abre)	$\Delta Carga$ (pu)	LB_{SYS} (%)		CO_{CAP} (pu)		Tempo (s)
				Inicial	Final	Inicial	Final	
70-42	66	76-77	0,0855	2,7860	2,8469	1,3238	1,3823	0,593
70-42	75	76-77	0,0855	2,7860	2,8469	1,3238	1,3823	0,593
42-2	51	82-81	0,0	2,5080	2,4221	1,2153	1,1966	0,656
42-2	58	82-81	0,0	2,5080	2,4221	1,2153	1,1966	0,500
54-30	37	42-46	0,0641	2,7309	2,7248	1,0655	1,0600	0,64
54-30	19	42-46	0,0641	2,7309	2,7248	1,0655	1,0600	1,156
30-2	22	38-43	0,0717	2,7420	2,7377	1,3262	1,4329	0,50
30-2	36	35-37	0,0773	2,7420	2,7344	1,3262	1,4450	0,078

Tabela 5.11: Resultados da Aplicação de ABCRMF na Rede 2.

são apresentadas graficamente os valores iniciais e finais de LB_{SYS} e CO_{CAP} e as fronteiras analisadas para cada alimentador, conforme Figura 5.14 e Figura 5.15, respectivamente.

Nos dois primeiros casos tem-se o $\Delta Carga$ desejado transferido, e tem-se um aumento nos índices, ou seja, um desbalanceamento no sistema e uma piora na capacidade de reserva dos alimentadores envolvidos. No 3º e 4º casos não houve transferência de carga e os índices apresentam pequenas diferenças relativas ao fluxo do cabo que foi transferido entre os alimen-

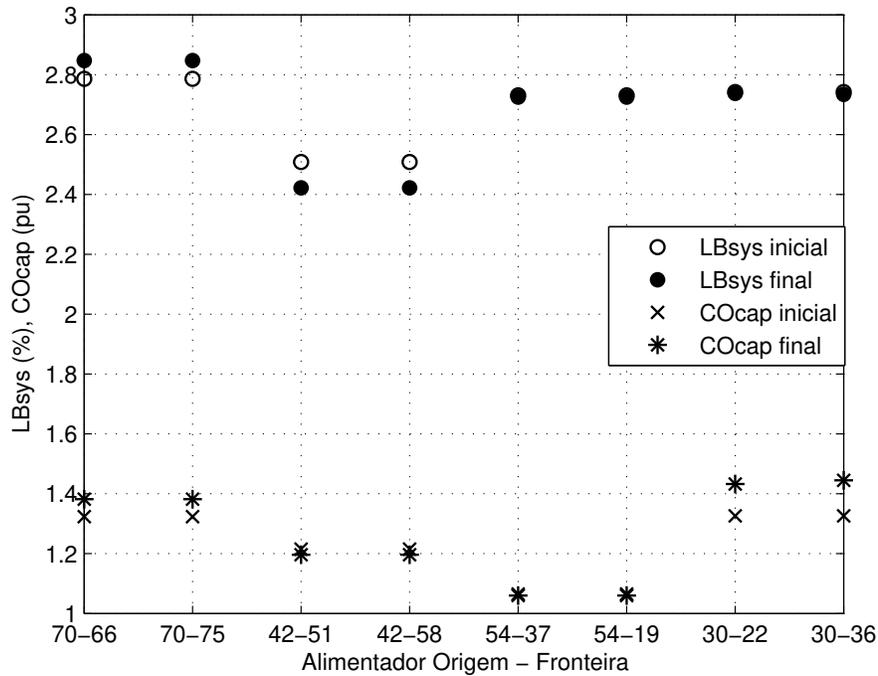


Figura 5.14: LB_{SYS} e CO_{CAP} inicial e final obtidas pela execução de ABCRMF na rede de distribuição 2.

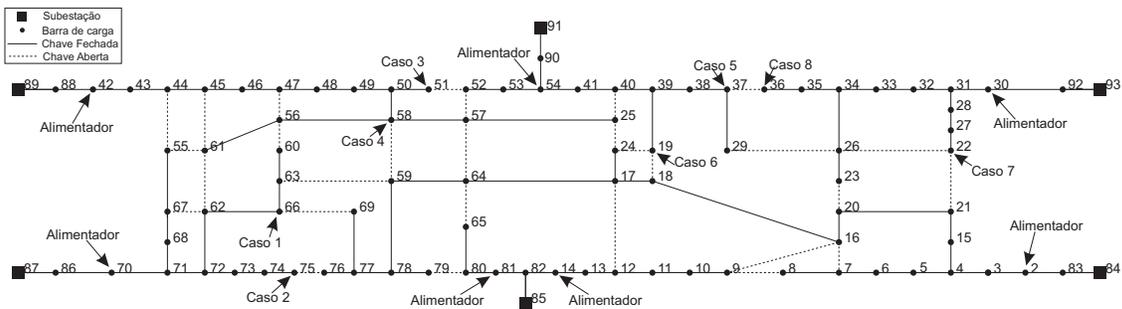


Figura 5.15: Fronteiras dos alimentadores da rede de distribuição 2.

tadores. No 5º e 6º casos os dois índices são reduzidos com a transferência de um $\Delta Carga$ inferior ao desejado. Percebe-se que com a transferência obtida houve uma melhora no balanceamento e na capacidade reserva. Nos últimos dois casos verificou-se uma redução do LB_{SYS} , melhorando assim o balanceamento de carga do sistema, porém com uma redução na capacidade de reserva dos alimentadores, expressa pelo aumento do CO_{CAP} . Quanto aos tempos computacionais, nas cinco primeiras instâncias e nas duas últimas o ABCRMF gastou menos de 1 segundo. Na sexta, entretanto foi necessário um pouco mais de 1 segundo.

Rede 3:

O resultado da simulação do ABCRMF na rede 3 encontram-se na Tabela 5.12.

Alimentador (Origem-Destino)	Fronteira	Chaveamento (Fecha-Abre)	$\Delta Carga$ (pu)	LB_{SYS} (%)		CO_{CAP} (e-3pu)		Tempo (s)
				Inicial	Final	Inicial	Final	
1058-1096	319	1073-1067	0,0857	5,1325	5,3120	4,1510	4,1513	1,218

Tabela 5.12: Resultado da Aplicação de ABCRMF na Rede 3.

Conforme Tabela 5.12, verifica-se que a transferência de um $\Delta Carga$ de 0,0857 pu do alimentador 1058 foi obtido preservando-se a fronteira 319, com uma pequena variação nos valores de LB_{SYS} e CO_{CAP} . Neste caso, consegue-se a transferência de carga desejada, mantendo a fronteira, com uma pequena piora no balanceamento de carga do sistema e na capacidade de reserva dos alimentadores envolvidos. O tempo computacional gasto foi um pouco mais de 1 minuto.

Rede 4:

Na Tabela 5.13 é apresentado o resultado para o alimentador 2425 como origem preservando a fronteira 91.

Alimentador (Origem-Destino)	Fronteira	Chaveamento (Fecha-Abre)	$\Delta Carga$ (pu)	LB_{SYS} (%)		CO_{CAP} (pu)		Tempo (s)
				Inicial	Final	Inicial	Final	
2425	91	2431-2430	0,3187	13,5691	13,1039	1,4394	1,4400	5,5

Tabela 5.13: Resultado da Aplicação de ABCRMF na Rede 4.

Como percebe-se na Tabela 5.13, o tempo computacional gasto para a rede 4, que é de grande porte, foi maior que 5 segundos. O alimentador executou uma transferência superior ao valor do $\Delta Carga$ desejado. A fronteira foi mantida e o valor de LB_{SYS} foi reduzido, melhorando o balanceamento do sistema, porém houve uma piora na capacidade reserva dos alimentadores envolvidos, devido a uma pequena redução no valor de CO_{CAP} .

5.6 Resultado para o Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado *Multi-Tier*

Esta seção inclui os resultados do ABCRMMT (Magalhães, 2007) para as quatro redes de distribuição da Tabela 5.1. O ABCRMMT executa a transferência de um $\Delta Carga$ entre o alimentador origem e seus adjacentes. Se o $\Delta Carga$ desejado não for obtido, o *Multi-Tier* será utilizado, com o objetivo de minimizar o balanceamento de carga do sistema. O valor de $\Delta Carga$ desejado para transferência é de 0,075 pu para as redes 1, 2 e 3 e 0,006 pu para a rede 4.

Rede 1:

A rede 1 não apresenta resultados para *Multi-Tier*, isto porque a rede é composta por dois alimentadores e a transferência só poderia acontecer de um alimentador para o outro, sem possibilidade de subir para camadas mais altas.

Rede 2:

As simulações de *Multi-Tier* para a rede 2 encontram-se na Tabela 5.14.

Alimentador (Origem-Destino)	Tier	Chaveamento (Fecha-Abre)	$\Delta Carga$ (pu)	LB_{SYS} (%)		CO_{CAP} (pu)		Tempo (s)
				Inicial	Final	Inicial	Final	
14-2	0	18-17	0,0781	2,6922	2,7010	1,2606	1,3768	0,062
70-42	0	76-77	0,0855	2,7860	2,8469	1,3238	1,3823	0,296
54-30	0	42-46	0,0641	2,7309	2,7248	1,0655	1,0600	
30-2	1	35-37	0,0770	2,7248	2,7178	1,0600	1,1761	0,062
54-30	0	53-54	0,1455	2,7178	2,7441	1,1761	1,1660	
30-2	0	35-37	0,0773	2,7420	2,7344	1,3262	1,4450	0,062

Tabela 5.14: Resultados da Aplicação de ABCRMMT na Rede 2.

Pelos resultados da Tabela 5.14 é possível concluir que o alimentador 54 foi o único que realizou transferência de carga em *Multi-Tier*. Nas outras simulações obtém-se a transferência

do $\Delta Carga$ desejado com apenas um *Tier*. O tempo gasto para as simulações é inferior a meio segundo.

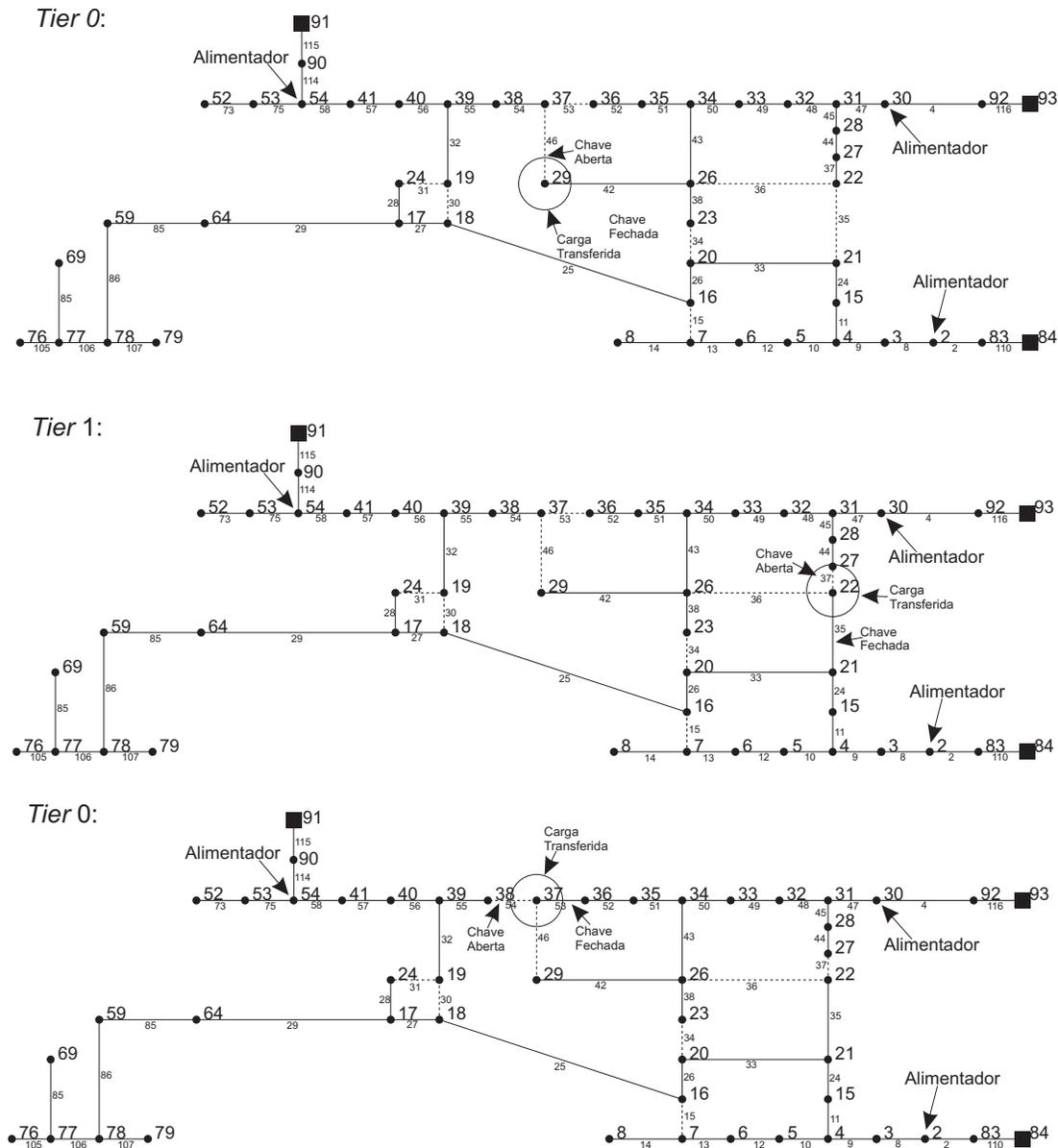


Figura 5.16: Multi-chaveamento do alimentador 54 da rede de distribuição 2.

A Figura 5.16 ilustra o multichaveamento executado para o alimentador 54 da rede 2. Verifica-se que no *Tier* 0 houve transferência de carga de 0,0641 pu para o alimentador 30. Como o valor transferido é menor que o desejado, passa-se ao *Tier* 1. No *Tier* 1 nota-se a transferência de 0,0770 pu do alimentador 30, adjacente ao alimentador origem. Quando retorna-se ao *Tier* 1, há uma nova transferência de carga do alimentador 54 para o 30, que

foi aliviado no *Tier* anterior. Assim tem-se uma transferência de carga total de 0,2096 pu do alimentador 54.

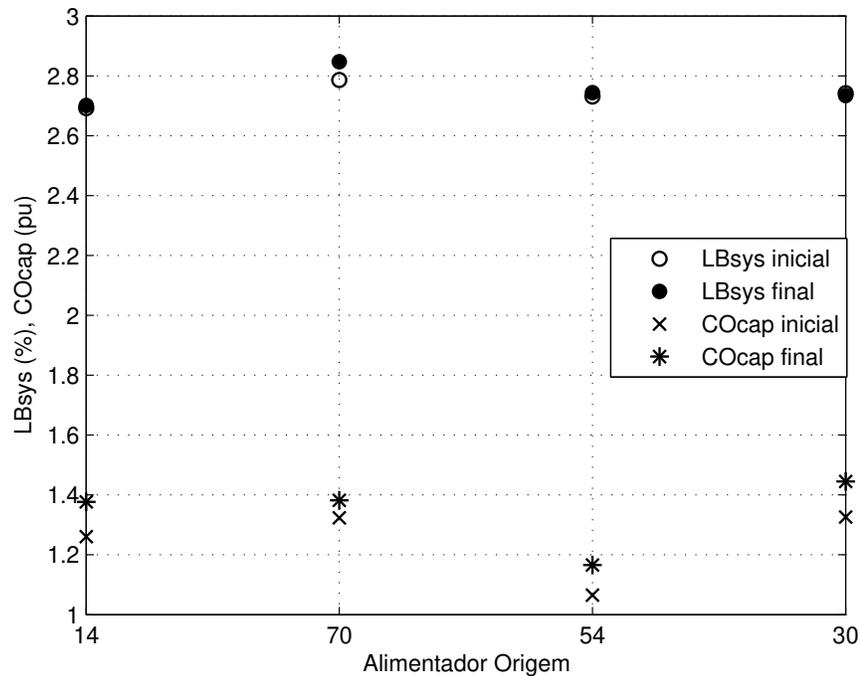


Figura 5.17: LB_{SYS} e CO_{CAP} inicial e final obtidas pela execução de ABCRMMT na rede de distribuição 2.

A Figura 5.17 mostra os valores iniciais e finais de LB_{SYS} e CO_{CAP} para cada instância. Nota-se que nas duas primeiras instâncias houve uma piora no balanceamento de carga e na capacidade reserva dos alimentadores envolvidos. Na última instância houve melhora no balanceamento de carga, mas uma piora na capacidade reserva. Na terceira instância, multi-chaveamento, houve uma piora na função objetivo: balanceamento de carga e na capacidade dos alimentadores envolvidos.

Rede 3:

Os resultados das simulações para a rede 3 considerando multi-chaveamento encontram-se na Tabela 5.15.

Pela tabela 5.15 nota-se que houve transferência de carga por *Multi-Tier* para o alimentador 1096. Percebe-se que no *Tier* 0 não houve possibilidade de transferência de carga

Alimentador (Origem-Destino)	Tier	Chaveamento (Fecha-Abre)	$\Delta Carga$ (pu)	LB_{SYS} (%)		CO_{CAP} (e-3pu)		Tempo (s)
				Inicial	Final	Inicial	Final	
1012-1096	0	1036-1047	0,1627	3,9998	3,4503	2,5191	13,1374	2,156
1096	0	-	-	5,5801	5,5801	13,1374	13,1374	
1058-1012	1	1045-1067	0,0857	5,5801	5,6037	13,1374	20,1985	1,453
1096-1058	0	1124-1143	0,1556	5,6037	5,4139	20,1985	4,1513	
1058-1096	0	1124-1094	0,1230	5,1325	5,0835	4,1510	4,1513	0,906

Tabela 5.15: Resultados da Aplicação de ABCRMMT na Rede 3.

para o alimentador origem. No *Tier* 1 acontece a transferência de carga do alimentador 1058, que é adjacente ao origem. Esta transferência proporciona o alívio do alimentador origem, que executou uma transferência de carga para o alimentador 1058. Nas outras simulações obtém-se a transferência do $\Delta Carga$ desejado com apenas um *Tier*. Quanto aos tempos computacionais, no primeiro caso o ABCRMMT gastou pouco mais de 2 segundos. No segundo caso, um segundo e meio e no terceiro caso foi necessário quase um segundo.

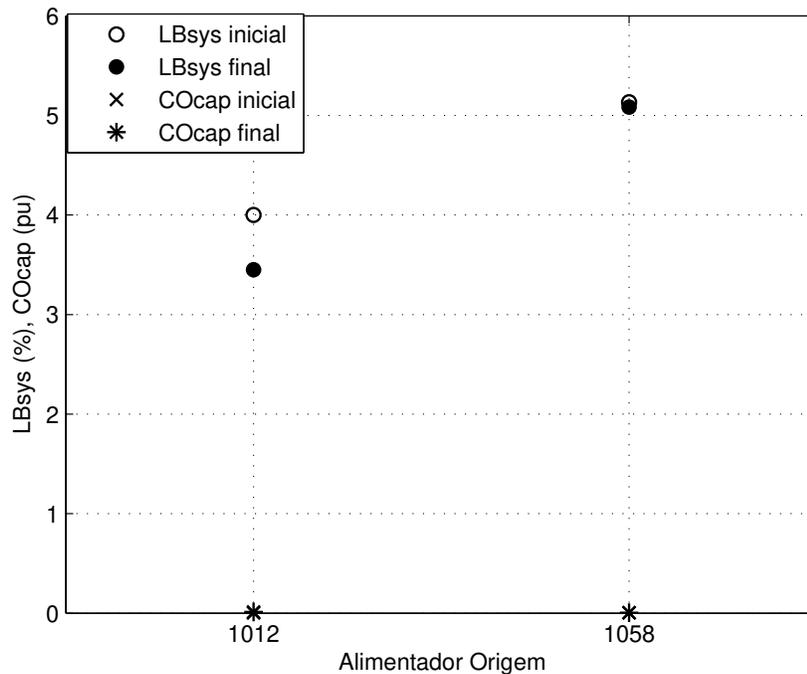


Figura 5.18: LB_{SYS} e CO_{CAP} inicial e final obtidas pela execução de ABCRMMT na rede de distribuição 3.

Pela Figura 5.18 percebe-se que para o primeiro e último caso o alívio de carga proporciona uma melhora no valor da função objetivo e uma piora na capacidade reserva dos alimentadores. Já no multi-chaveamento houve uma melhora tanto no balanceamento quanto na capacidade reserva dos alimentadores envolvidos.

Rede 4:

A Tabela 5.16 apresenta os resultados da aplicação do ABCRMMT na rede de distribuição 4, para um $\Delta Carga$ desejado de 0,006 pu.

Alimentador (Origem-Destino)	Tier	Chaveamento (Fecha-Abre)	$\Delta Carga$ (pu)	LB_{SYS} (%)		CO_{CAP} (pu)		Tempo (s)
				Inicial	Final	Inicial	Final	
2404-2411	0	2726-31	0,3331	11,6999	12,1260	1,4677	1,3022	4,953
2544-2425	0	2727-2541	0,0223	13,4355	13,4075	1,4218	1,4218	4,984
2558-2600	0	2552-2555	0,1059	12,9153	12,9004	1,4191	1,3325	5,234
2581	0	-	-	12,5234	12,5234	1,3603	1,3603	6,625
-	1	-	-	12,5234	12,5234	1,3603	1,3603	
2404-2411	2	2726-31	0,3331	12,5234	12,1568	1,3603	1,1404	
2624-2404	1	2725-1805	0,0292	12,1568	12,0834	1,1404	1,1374	
2581-2624	0	2724-2583	0,0532	12,0834	12,1626	1,1374	1,1376	
2624	0	-	-	13,2105	13,2105	1,3912	1,3912	
2404-2411	1	2726-31	0,3331	13,2105	12,8714	1,3912	1,1715	5,531
2624-2404	0	2725-1805	0,02917	12,8714	12,8669	1,1715	1,1685	

Tabela 5.16: Resultados da Aplicação de ABCRMMT na Rede 4.

Pela Tabela 5.16 percebe-se que tem-se duas simulações com uso de transferências via *Tier*. Nas três primeiras instâncias houve transferência de carga em um único *Tier*. O tempo gasto é de aproximadamente 6 segundos, este aumento no tempo computacional é justificado pela rede ser de grande porte.

A Figura 5.19 representa o *Tier* 0 e o *Tier* 1 da quarta instância, composta pelo alimentador 2581 e os alimentadores adjacentes. Verifica-se pela Tabela 5.16 que, tanto no *Tier* 0 como no *Tier* 1, o alimentador 2581 e os alimentadores que são adjacentes ao 2581 não transferiram carga. Já no *Tier* 2, como verifica-se na Figura 5.20 houve a transferência de 0,03331 pu do alimentador 2404 para o alimentador 2411. O alimentador 2404 é adjacente

ao alimentador 2624, que por sua vez é adjacente ao alimentador origem, neste caso o 2581. A Figura 5.21 apresenta o retorno ao *Tier* 1 onde tem-se a transferência de 0,0292 pu de carga do alimentador 2624 para o alimentador 2404, permitindo assim, a transferência de carga do alimentador origem 2581 para um alimentador adjacente 2624, ilustrado pela Figura 5.22.

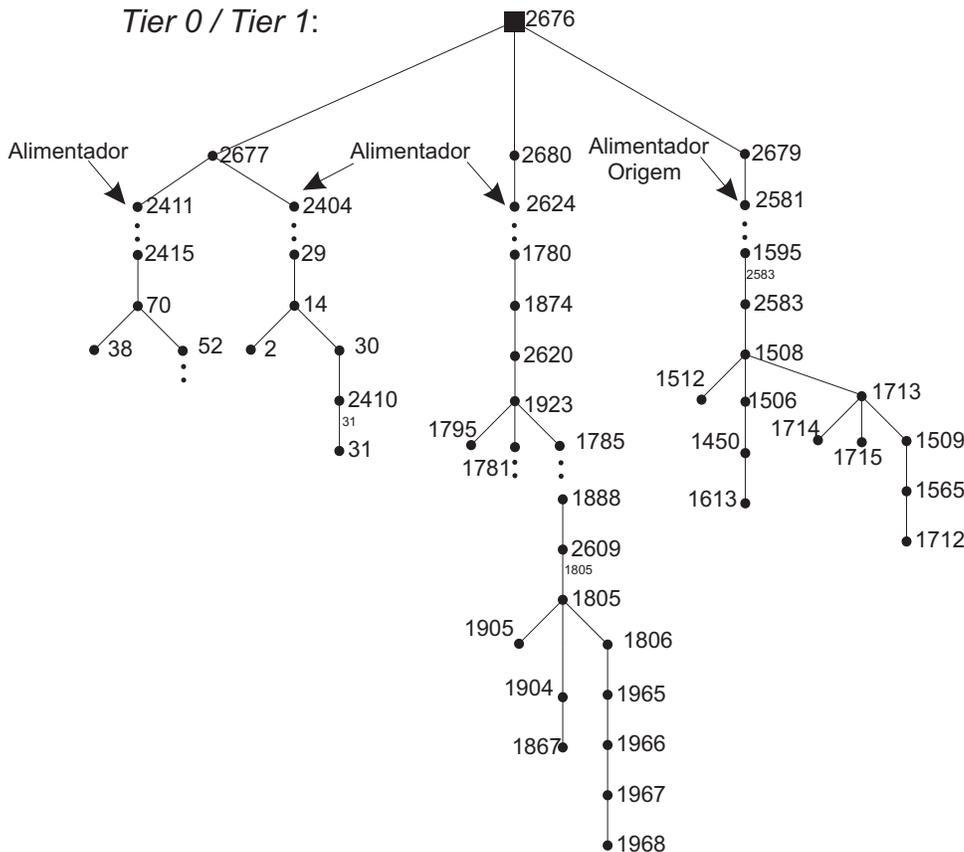


Figura 5.19: Alimentador 2581 e adjacentes da rede de distribuição 4.

A última instância é representada também pela Figura 5.19, diferenciando apenas no alimentador origem que passa a ser o 2624. Esta representa o *Tier* 0 e não há transferência de carga. No *Tier* 1, houve uma transferência de carga de 0,3331 pu do alimentador 2404 para o 2411 ilustrada pela Figura 5.20 da instância anterior. Assim, quando se retorna ao *Tier* 0 obtém-se o alívio de carga do alimentador origem, situação já ilustrada pela Figura 5.21 da instância anterior.

A Figura 5.23 apresenta o comportamento de LB_{SYS} e CO_{CAP} para as instâncias. Na primeira instância houve uma piora no valor da função objetivo com a transferência de carga entre os alimentadores e uma piora na capacidade reserva dos alimentadores. Na segunda

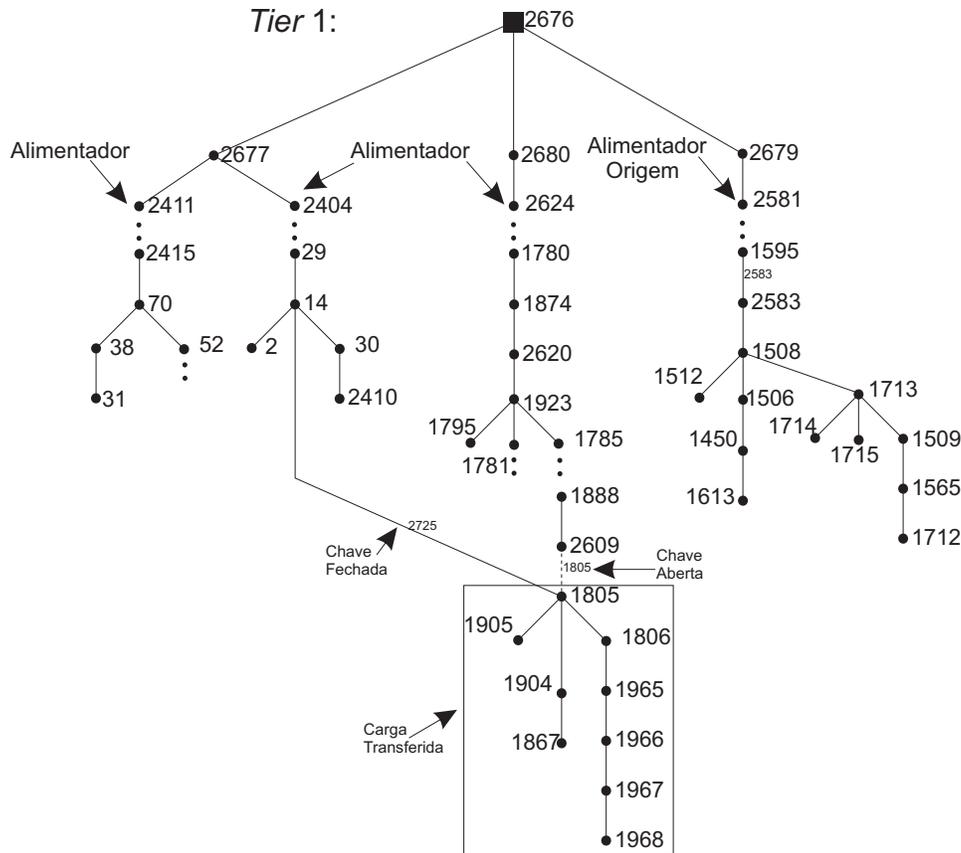


Figura 5.21: Retorno O Tier 1 do multi-chaveamento do alimentador 2581 da rede de distribuição 4.

Rede 2:

A Tabela 5.18 apresenta os resultados das simulações, considerando multi-chaveamento e fronteira, para os alimentadores da rede de distribuição 2.

Pela Tabela 5.17 verifica-se que no primeiro caso houve transferência do $\Delta Carga$ desejado em apenas um Tier. Para o alimentador 54 são feitas duas simulações, preservando a fronteira 37 e 19, nos dois casos obteve-se multi-chaveamento. O tempo de simulação para os dois primeiros casos são menores do que um de segundo e para o terceiro caso um pouco mais que um segundo.

A Figura 5.24 apresenta o 3º caso, que preserva a fronteira 19. No Tier 0 foi realizada uma transferência de 0,0641pu de carga do alimentador 54 para o 30, porém o $\Delta Carga$ transferido foi menor que o desejado, por isso camadas mais altas são necessárias. No Tier 1 houve o alívio do alimentador 30, adjacente ao origem, para o alimentador 2. Retornando ao

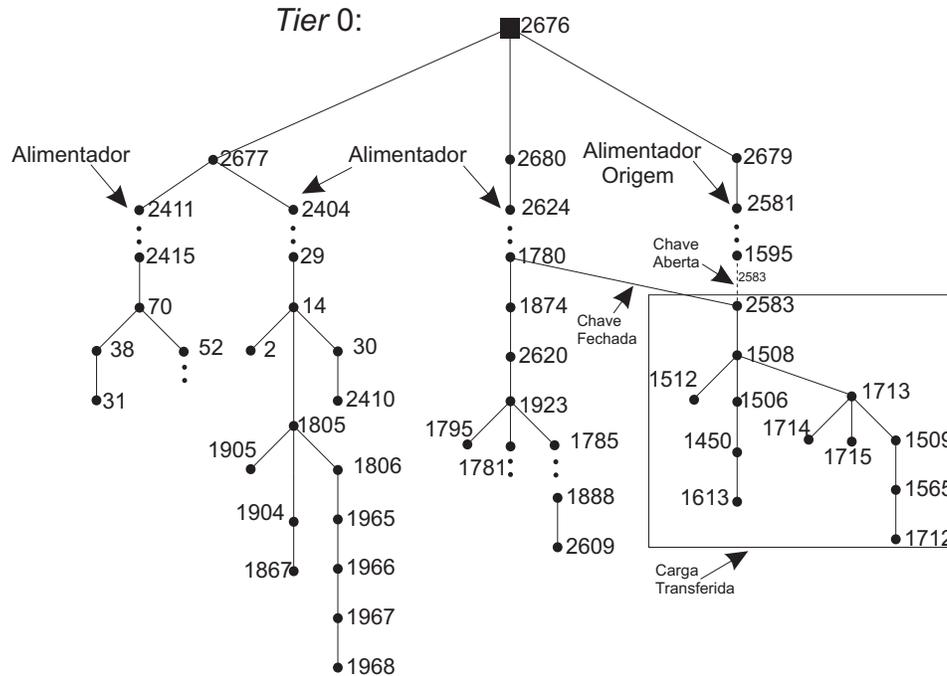


Figura 5.22: Retorno ao *Tier 0* do multi-chaveamento do alimentador 2581 da rede de distribuição 4.

Alimentador (Origem-Destino)	Tier	Fronteira	Chaveamento (Fecha-Abre)	$\Delta Carga$ (pu)	LB_{SYS} (%)		CO_{CAP} (pu)		Tempo (s)
					Inicial	Final	Inicial	Final	
70-42	0	66	76-77	0,0855	2,7860	2,8469	1,3238	1,3823	0,609
54-30	0	37	42-46	0,0641	2,7309	2,7248	1,0655	1,0600	0,968
30-2	1	-	35-37	0,0769	2,7248	2,7178	1,0600	1,1761	
54	0	-	-	-	2,7178	2,7178	1,1761	1,1761	
54-30	0	19	42-46	0,0641	2,7309	2,7248	1,0655	1,0600	1,343
30-2	1	-	35-37	0,0769	2,7248	2,7178	1,0600	1,1761	
54-30	0	-	53-54	0,1455	2,7178	2,7441	1,1761	1,1660	

Tabela 5.17: Resultados da Aplicação de ABCRMMTF na Rede 2.

Tier 1 houve uma nova transferência de carga, conseguindo, assim, a transferência $\Delta Carga$ desejada. Já no 2º caso, onde a fronteira é o nó 37, quando retorna-se ao *Tier 0* não houve nova transferência de carga.

A Figura 5.25 apresenta os valores iniciais e finais de LB_{SYS} e CO_{CAP} para as instâncias da Tabela 5.17. No 1º e 3º casos houve uma piora no valor da função objetivo com a transferência de carga entre os alimentadores e uma piora na capacidade reserva dos alimenta-

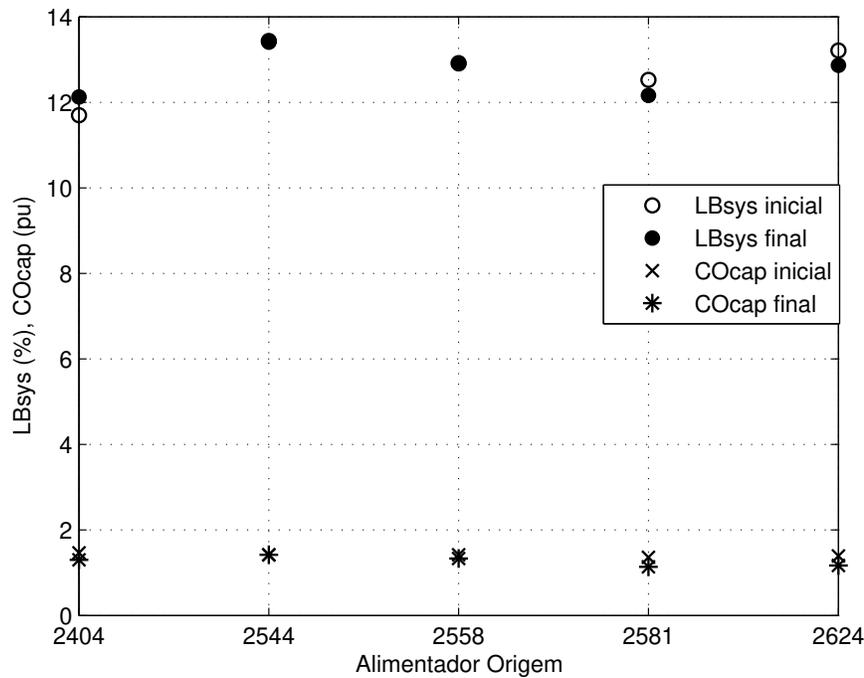


Figura 5.23: LB_{SYS} e CO_{CAP} inicial e final obtidas pela execução de ABCRMMT na rede de distribuição 4.

dores. No 2º caso houve uma melhora na função objetivo e uma piora na capacidade reserva dos alimentadores envolvidos.

Rede 3:

Os resultados da aplicação de ABCRMMTF para a rede de distribuição 3 encontram-se na Tabela 5.18. Percebe-se que para o alimentador 1012 com a fronteira 227 a ser preservada não houve transferência no *Tier* 0. No *Tier* 1, obteve-se o alívio do alimentador adjacente ao origem e no *Tier* 0, novamente, consegue-se o alívio da carga desejada. Para o alimentador 1096 com fronteira 997 não houve transferência de carga no *Tier* 0. No *Tier* 1 houve uma transferência de carga de 0,857 pu do alimentador 1058, adjacente ao origem, para o alimentador 1012. Retornando ao *Tier* 0 houve a transferência do $\Delta Carga$ desejado, preservando a fronteira. Para o alimentador 1058 obteve-se a transferência do $\Delta Carga$ desejado com apenas um *Tiere* preservando a fronteira 319. Quanto aos tempos computacionais, nas três simulações o ABCRMMTF gastou menos de 2 segundos.

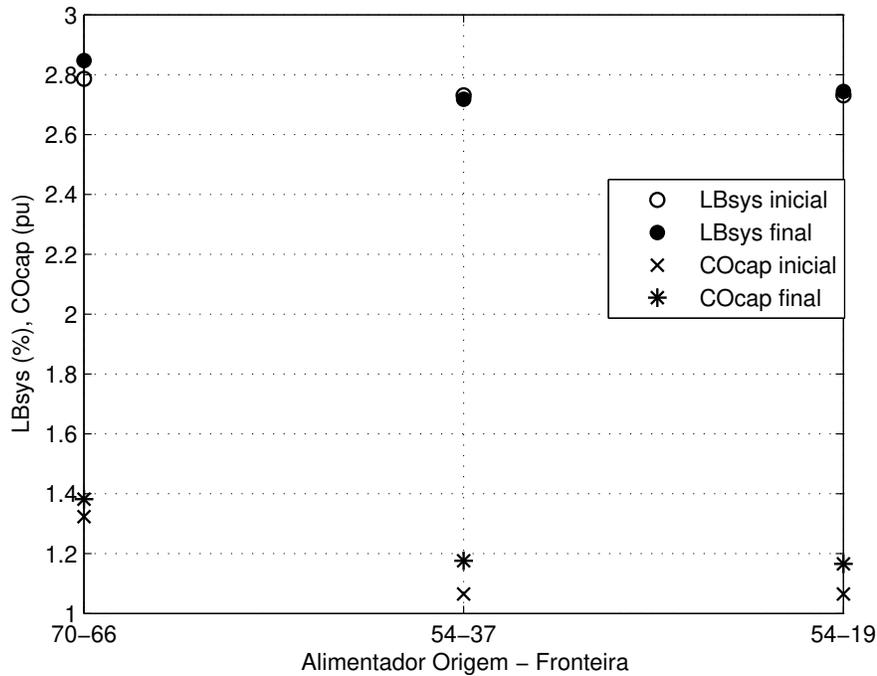


Figura 5.25: LB_{SYS} e CO_{CAP} inicial e final obtidas pela execução de ABCRMMTF na rede de distribuição 2.

Alimentador (Origem-Destino)	Tier	Fronteira	Chaveamento (Fecha-Abre)	$\Delta Carga$ (pu)	LB_{SYS} (%)		CO_{CAP} (e-3pu)		Tempo (s)
					Inicial	Final	Inicial	Final	
1012	0	227	-	-	3,9998	3,9998	2,5191	2,5191	1,531
1058-1096	1	-	1124-1094	0,1230	3,9998	3,6422	2,5191	6,0358	
1012-1096	0	-	1017-1013	0,1611	3,6422	3,4150	6,0358	20,1985	
1096	0	997	-	-	5,5801	5,5801	13,1374	13,1374	1,468
1058-1012	1	-	1045-1067	0,0857	5,5801	5,6037	13,1374	20,1985	
1096-1058	0	-	1124-1143	0,1556	5,6037	5,4139	20,1985	4,1513	
1058	0	319	1073-1067	0,0857	5,1325	5,3120	4,1510	4,1513	1,203

Tabela 5.18: Resultados da Aplicação de ABCRMMTF na Rede 3.

Rede 4:

A rede 4 não apresenta resultados para *Multi-Tier* com fronteira. A rede 4 na Seção 5.6 apresentou apenas dois casos de simulações com multi-chaveamento. Incluindo uma fronteira a ser preservada, a rede não apresenta operações de chaveamento, ou seja, não há transferência de carga entre os alimentadores. Isto se deve ao fato de que a rede 4 é uma rede com poucos nós fronteira, diminuindo as possibilidades de manobras.

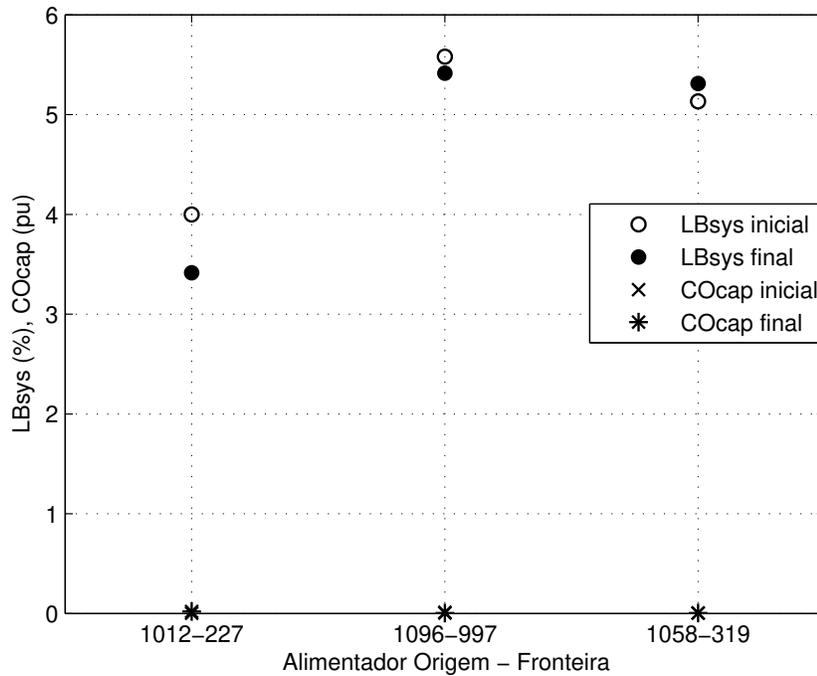


Figura 5.26: LB_{SYS} e CO_{CAP} inicial e final obtidas pela execução de ABCRMMTF na rede de distribuição 3.

5.8 Análise das Redes

A rede 1 é uma rede com dois alimentadores, o que reduz as possibilidades de transferências. Entretanto, por se tratar de uma rede acadêmica, a consideração de todos os arcos como chave favorece a separação das cargas e portanto aumenta as chances de carga de um alimentador para o outro. A rede 2 é também uma rede acadêmica (todos os arcos foram considerados chaves), mas apresenta 7 alimentadores e a chance de transferência é bem maior que na rede 1. Na rede 3 as dificuldades para transferência se referem ao número reduzido de chaves, apenas 5,85 % de todos os arcos, o que dificulta o isolamento das cargas. A rede 4 também apresenta as mesmas limitações da rede 3, 9,78 % de todos os arcos são chaves. Com isso, as características específicas das redes explicam a dificuldade em obter resultados positivos.

Capítulo 6

Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho propõe um método para o problema de reconfiguração de rede para balanceamento de carga, a fim transferir carga de um determinado alimentador aos seus adjacentes por questões operativas, para facilitar uma eventual manutenção ou até mesmo para reenergizar áreas “fora de serviço” (Restauração de Serviço). A resposta fornecida pelo método de resolução deve ser segura o suficiente quanto às restrições operativas da rede, na medida em que não permite a violação dos limites de tensão e mantém a radialidade da rede. Além disso, este plano de restauração proposto deve ser seguro o suficiente para evitar o desligamento de outras partes da rede em função da atuação dos dispositivos de proteção, devido à violação dos limites de fluxo de potência nas linhas. Com estas restrições foram desenvolvidos sete algoritmos baseados no método DMT com várias técnicas para a escolha das operações de chaveamento. A função objetivo considerada no problema abordado: minimização do índice de balanceamento de carga. O uso da técnica de multichaveamento possibilita uma melhor avaliação das soluções factíveis, proporcionando assim o alívio de carga no alimentador desejado.

Os resultados obtidos mostram que o método DMT proposto identifica a melhor operação de chaveamento para otimizar o balanceamento de carga do sistema, com um baixo esforço computacional. Os resultados das simulações para as redes propostas mostram a eficiência dos métodos empregados. Há melhora no índice de balanceamento de carga do sistema e obtém-se as transferências de carga do alimentador origem através de técnica de alívio ou multichaveamento.

Como um aspecto favorável dos algoritmos desenvolvidos é possível citar o baixo tempo computacional requerido.

A seguir destacam-se as principais contribuições deste trabalho:

- Desenvolvimento de um modelo para o problema de balanceamento de carga e restauração de serviço utilizando o método de DMT;
- Abordagem de balanceamento entre todos os alimentadores e considerando um alimentador como origem, executando o balanceamento entre os adjacentes a fim de obter um alívio de carga para facilitar uma eventual manutenção ou até mesmo para reenergizar áreas “fora de serviço”;
- Abordagem da técnica de multichaveamento para balanceamento de carga e restauração de serviço.

Por fim, algumas perspectivas de trabalhos futuros:

- Análise de outras técnicas de busca ou metaheurísticas para a escolha das operações de chaveamento;
- Consideração de outra função objetivo: a avaliação da perda de energia total em todos os alimentadores;
- Consideração de outros aspectos para o problema de alívio de carga, tais como: perda mínima, número de chaveamentos.

Referências Bibliográficas

- Aarts, E. and Korst, J. (1989). *Simulated Annealing and Boltzmann Machines*, John Wiley & Sons.
- Augugliaro, A., Dusonchet, L. and Sanseverino, E. R. (1998). Service restoration in compensated distribution networks using a hybrid genetic algorithm, *Electric Power Systems Research* 46: 59-66.
- Augugliaro, A., Dusonchet, L. and Sanseverino, E. R. (2000). Multiobjective service restoration in distribution networks using an evolutionary approach and fuzzy sets, *Electrical Power and Energy Systems* 22: 103-110.
- Ahuja, R., Magnanti, T. and Orlin, J. (1993). *Network Flows: Theory, Algorithms and Applications*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Aoki, K., Kuwabara, H., Satoh, T. and Kanezashi M. (1988). An efficient algorithm for load balancing of transformers and feeders by switch operation in large scale distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery* 3(4): 1865-1872.
- Aoki, K., Nara, K., Itoh, M., Satoh, T. and Kuwabara H. (1989). A new algorithm for service restoration in distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery* 4(3): 1832-1839.
- Baran, M. E. and Wu F. F. (1989). Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing, *IEEE Transactions on Power delivery* 4(2): 1401-1407.
- Bazaraa, M. S., Jarvis, J. J. and Sherali, H. D. (1990). *Linear Programming and Network Flows*, John Wiley & Sons.

- Bazaraa, M. S., Sherali, H. D. and Shetty, C. M. (1993). *Nonlinear Programming*, Jonh Wiley & Sons.
- Booch, G., Rumbaugh, J. and Jaconson, I. (1999). *The Unified Modeling Language User Guide*, Addison-Wesley object technology series.
- Cavellucci, C. J. (1989). *Sistema especialista em manobras de redes de distribuição de energia elétrica*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas.
- Chiang, H. D. and Jean-Jumeau, R. (1990). Optimal network reconfigurations in distribution systems. Part I: A new formulation and a solution methodology, *IEEE Transactions on Power Delivery* 5(4): 1902-1909.
- Civanlar, S., Grainger, J. J., Yin, H. and Lee, S. S. H. (1988). Distribution feeder reconfiguration for loss reduction, *IEEE Transactions on Power Delivery* 3(3): 1217-1223.
- Cook, S. (1971). The complexity of theorem-proving procedures, *In Proceedings of the 3rd Annual ACM Symposium on the Theory of Computing*, pp. 151-158.
- Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L. and Stein, C. (2002). *Algoritmos*, Tradução da 2ª edição americana Teoria e Prática.
- Deitel, H. M. and Deitel, P. J. (2001). *C++ Como Programar*, Bookman, Porto Alegre.
- Fukuyama, Y. (2000). Reactive Tabu Search for distribution load transfer operation, *Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE*, Singapore, Vol. 2, pp. 1301-1306.
- Fukuyama, Y., Chiang, H. D. e Miu, K. N. (1996). Parallel genetic algorithm for service restoration in electric power distribution systems, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 18(2): 111-119.
- Furlan, J. D. (1997). *Modelagem de Objetos através da UML*, Makron Books.
- Garcia, V. J. (2005). *Metaheurísticas multiobjetivo para o problema de restauração de serviço em redes de distribuição de energia elétrica*, Dissertação de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas.

- Garcia, V. J. and França, P. M. (2005). Multiobjective Tabu Search for service restoration in electric distribution networks, *Proceedings of the 2005 IEEE, St.Petersburg PowerTech*, 7 pages.
- Garey, M. R. and Johnson, D. S. (1979). *Computers and intractability: A guide to the theory of NP-Completeness*, Freeman, San Francisco.
- Glover, F. and Laguna, M. (1997). *Tabu Search*, Kluwer Academic Publishers.
- Hsu Y-Y., Jwo-Hwu Y., Liu, S. S., Chen, Y. W., Feng, H. C. and Lee, Y. M. (1993). Transformer and feeder load balancing using a heuristic search approach, *IEEE Transactions on Power Systems* 8(1): 184-190.
- Jwo-Hwu, Y. (1997). The refined strategy for substation main transformer and feeder load balancing, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 19(2): 87-91.
- Kagan, N., Oliveira, C. C. B. de and Robba, E. J. (2005). *Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica*, Edgard Blücher, São Paulo.
- Kashem, M. A., Jasmon, G. B. and Ganapathy, V. (2000). A new approach of distribution system reconfiguration for loss minimization, *Electrical Power and Energy Systems* 22: 269-276.
- Kashem, M. A., Ganapathy, V. and Jasmon, G. B. (1999). Network reconfiguration for load balancing in distribution network, *IEE Proceedings- Generation, Transmission and Distribution* 146(6): 563-567.
- Larman, C. (2002). *Applying UML and Patterns: an introduction to object-oriented analysis and design*, second edn, Prentice Hall.
- Magalhães, A. S., Garcia, V. J. e França, P. M. (2007). Multi-chaveamento para restauração de serviço e balanceamento de carga em sistemas de distribuição de energia elétrica, *Anais do XXXIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, SBPO*, Artigo com 12 páginas, Fortaleza.
- Michalewicz, Z. (1996). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, third edn, Springer.

- Miu, K. N., Chiang, H. D., Yuan, B. and Darling, G. (1998). Fast service restoration for large-scale distribution systems with priority customers and constraints, *IEEE Transactions on Power Systems* 13(3): 789-795.
- Miu, K. N., Chiang, H. D. and McNulty, R. J. (2000). Multi-Tier service restoration through network reconfiguration and capacitor control for large-scale radial distribution networks, *IEEE Transactions on Power Systems* 15(3): 1001-1007.
- Morelato, A. L. and Monticelli, A. (1989). Heuristic search approach to distribution system restoration, *IEEE Transactions on Power Delivery* 4(4): 2235-2241.
- Mori, H. and Takeda, K. (1994). Parallel simulated annealing for power system decomposition, *IEEE Transactions on Power Systems* 9(2): 789-795.
- Newhauser, G. and Wolsey, L. (1999). *Integer and combinatorial optimization*, John Wiley & Sons, New York.
- Papadimitriou, C. H. and Steiglitz, K.(1982). *Combinatorial Optimization Algorithms and Complexity*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Pedrycz, W. and Gomide, F.(1998). *An introduction to fuzzy sets : analysis and design*, Cambridge, Mass.
- Rumbaugh, J., Blaha, M., Premerlani, W., Eddy, F. and Lorenzen, W.(1991). *Object-Oriented Modeling and Design*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Shirmohammadi, D. (1992). Service restoration in distribution networks via network reconfiguration, *IEEE Transactions on Power Delivery* 7(2): 952-958.
- Stevenson, W. D.(1986). *Elementos de análise de sistemas de potência*, McGraw-Hill, São Paulo.
- Stroustrup, B.(1997). *The C++ Programming Language, 3rd edn*, Murray Hill, New Jersey. Hall, Englewood Cliffs.
- Toune, S., Fudo, H., Genji, T., Fukuyama Y. and Nakanishi Y. (1998a). A Reactive Tabu Search for service restoration in electric power distribution systems, *IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, Anchorage Alaska, pp. 763-768.

- Toune, S., Fudo, H., Genji, T. and Fukuyama, Y. (2002). Comparative study of modern heuristic algorithms to service restoration in distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery* 17(1): 173-181.
- Toune, S., Fudo, H., Genji, T., Fujita, N., Fukuyama Y. and Nakanishi Y. (1998b). Hybrid Reactive system for service restoracion in distribution systems using expert system and Reactive Tabu Search, *IEEE International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 4 pages.
- Wu J. S., Tomsovic K. L. and Chen, C. S. (1991). A heuristic search approach to feeder switching operations for overload, faults, unbalanced flow and maintenance, *IEEE Transactions on Power Delivery* 6(4): 1579-1585.

Apêndice A

Modelagem Computacional - Estrutura de Classes

O conjunto de classes apresentado na Figura 3.1 e em Garcia (2005) está subdividido em cinco subconjuntos: algoritmos, entrada e saída, estruturas de dados auxiliares, instância e solução. Cada um desses subconjuntos, também chamados de pacotes, relaciona uma coleção de classes com características semelhantes, permitindo mais um nível de modularização do sistema.

A seguir descreve-se cada um desses pacotes e os relacionamentos entre as classes incluídas nos mesmos.

A.1 Módulo Entrada e Saída

Nesse pacote estão relacionadas classes que servem para fazer a leitura dos dados de entrada para o problema e fornecer o resultado da execução do algoritmo.

As classes relacionadas são:

- Lê: essa classe reúne todos os elementos próprios da linguagem para realizar a leitura de dados de um arquivo. Estão incluídos um conjunto de métodos capazes de ler vários tipos de dados, como números (inteiros e reais), seqüências de caracteres e linhas inteiras.
- Lê chaves: corresponde a uma especialização da classe Lê, destinada à leitura de um arquivo utilizado para descrever quais tipos de chaves poderão ser manipuladas pelo al-

goritmo de balanceamento. Isso equivale a dizer quais arestas do grafo, segundo seus tipos, serão considerados como manipuláveis.

- Lê instância: também é uma especialização da classe Lê. O arquivo que contém todas as informações da instância do problema é lido por ela, compreendendo, entre outras coisas, a relação de vértices e arestas que formarão o grafo sobre o qual o algoritmo trabalhará.
- Lê solução: esta classe também aproveita todo código incluído na classe Lê através de seu relacionamento de especialização com a mesma. Sua função é ler o arquivo que informa quais arestas estão energizadas, o que significa dizer qual é a rede (árvore) em operação.
- Lê tipos: o arquivo lido por esta classe, outra subclasse da classe Lê, informa todos os tipos possíveis para as arestas da rede. Isto inclui não somente os tipos de cabos mas também as possíveis chaves.
- Escreve: esta classe agrega métodos para manipulação de arquivos de saída, incluindo mecanismos para escrita de números e seqüências de caracteres.

A.2 Módulo Estrutura de Dados Auxiliares

Neste pacote estão incluídas classes que servem como suporte para os algoritmos e para as estruturas de dados próprias destes. Segue uma breve descrição de todas elas.

- Fila: esta classe é a implementação de uma estrutura de dados muito conhecida em computação, a chamada fila (*first-in-first-out* FIFO). As funções básicas incluídas são a inclusão (no final) e remoção de elementos (no início).
- Pilha: correspondendo a uma especialização da classe Fila, a Pilha é um tipo particular de fila na qual tanto a inclusão quanto a remoção de elementos ocorre no final (*last-in-first-out* LIFO).
- Lista Ligada: nesta classe é implementada uma versão de uma lista ligada. A grande justificativa para sua criação é a necessidade de manipular elementos em um conjunto com a inclusão e/ou remoção de elementos em qualquer posição, sugerindo uma estrutura de armazenamento não-sequencial com tamanho variável.

- **Árvore:** a estrutura de dados implementada nesta classe corresponde a uma lista de objetos da classe **Vértice-Árvore** (agregação de objetos desta classe). Seu objetivo é representar um grafo árvore com uma propriedade especial: qualquer vértice pode ser raiz.
- **Vértice-Árvore:** esta classe destina-se unicamente a armazenar o vértice do grafo árvore implementado pela classe **Árvore**. Ela prevê uma lista de vértices sucessores e um campo para armazenar o vértice predecessor.

A.3 Módulo Instância

Neste pacote estão reunidas todas as classes relativas à Instância do problema de balanceamento de carga e restauração de serviço. Elas correspondem a um relacionamento de agregação, ou seja, as classes **Aresta**, **Vértice**, **Cabo**, e **Setor** são parte da classe **Instância**, que por sua vez possui uma classe especializada **Instância Restauração**. Segue uma breve descrição de cada uma delas.

- **Aresta:** esta classe reúne informações a respeito da ligação entre dois objetos da classe **Vértice**. Os dados relacionam o número de cada um desses vértices, o tipo (se é chave, um ramo de ligação, um disjuntor, etc.), além de guardar um campo que relaciona o tipo de cabo (elemento da classe **Cabo**) que forma essa aresta.
- **Cabo:** todos os dados elétricos como resistência, reatância, máxima corrente admissível e corrente econômica são reunidos nessa classe. Ela está associada à classe **Aresta** para relacionar o tipo de cabo e a referência física na rede.
- **Vértice:** esta classe guarda detalhes de cada ponto da rede elétrica. Esses pontos podem ser de vários tipos (vértices de consumo, transformadores, subestações, etc.) e devem ter a referência para a localização física na rede (coordenadas no plano cartesiano, por exemplo).
- **Setor:** esta classe é uma abstração criada neste trabalho e com uma semântica particular. Sua função é armazenar blocos da rede (coleções de arestas e vértices) que não terão sua configuração (ligação) alterada, independente da manobra de chaves escolhida. A estrutura desses blocos é sempre uma árvore, dado o modelo das redes elétricas brasileiras. O

relacionamento com a classe *Árvore* denota o uso desta estrutura de dados para realizar a armazenagem dos blocos de forma eficiente.

- *Instância*: o problema propriamente dito, com todos os dados e estruturas auxiliares, é armazenado nesta classe. Ela compreende um conjunto de arestas, um de vértices, um de cabos e um de setores, os quais formam a representação matemática do problema ser a resolvido. Vale lembrar que esta representação é adequada também para problemas de reconfiguração de redes de energia elétrica.

A.4 Módulo Solução

Para resolver o problema de reconfiguração de rede para balanceamento de carga e para restauração de serviço, a partir da representação adequada do problema incluída no pacote *Instância*, é preciso representar adequadamente uma solução. Este pacote tem justamente esta função, qual seja, a de prover classes relacionadas com a representação da solução e classes que incluem conjuntos delas. Segue uma breve descrição de todas elas.

- *Solução*: uma estrutura de dados e os demais ítems necessários para representar uma solução para um problema de reconfiguração de redes é incluída nesta classe. São incluídos dados referentes à estrutura da rede e aos fatores elétricos decorrentes da configuração que a solução representa.

Quanto aos relacionamentos entre as classes deste pacote e as demais, salienta-se o relacionamento entre uma solução e a instância do problema a que ela se refere. Isso se faz necessário para que os dados referentes ao problema estejam corretamente associados à solução.

A.5 Módulo Algoritmo

Este pacote destina-se às classes que compõem o método matemático propriamente dito. Uma outra classe em particular auxilia nos cálculos elétricos das soluções potenciais: a classe *Fluxo de Carga*. A seguir são descritas sucintamente essas quatro classes.

- Fluxo de Carga: destina-se a armazenar os métodos de cálculo de fluxo de potência utilizados no método proposto. O método utilizado é o *backward-forward-sweep method*, descrito na Seção 2.2.
- Algoritmo Construtivo: esta classe inclui o algoritmo construtivo responsável por criar as soluções iniciais, eventualmente soluções eficientes. Seu relacionamento com a classe Instância Balanceamento se faz necessário pela dependência dos dados relativos ao problema.

Apêndice B

MULTI-CHAVEAMENTO PARA RESTAURAÇÃO DE SERVIÇO E BALANCEAMENTO DE CARGA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Alana da Silva Magalhães

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - UNICAMP

C.P. 6101 - Densis/FEEC

alanadsm@gmail.com

Vinícius Jacques Garcia

Centro de Tecnologia de Alegrete - UNIPAMPA

viniciusjg@gmail.com

Paulo Morelato França

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - UNICAMP

C.P. 6101 - Densis/FEEC

paulo.morelato@gmail.com

RESUMO

Sistemas de distribuição de energia elétrica podem ser reconfigurados em sua topologia visando operações de manutenção, reenergização de áreas escuras causadas por temporais ou balanceamento da carga dos alimentadores. Este trabalho considera o problema de reconfiguração da rede com o objetivo de balancear a carga dos alimentadores. Considera-se também um caso particular no qual há a necessidade de transferir carga de um determinado alimentador para os seus adjacentes por questões operativas, a fim de facilitar uma eventual manutenção ou visando a restauração de áreas desenergizadas. É apresentado um método de balanceamento de carga conhecido como “*Distance Measurement Technique (DMT)*” aplicado a uma técnica de multi-chaveamento usada para determinar as operações de chaveamento envolvidas. A flexibilidade e a eficácia do método proposto são demonstradas em testes com sistemas reais.

PALAVRAS CHAVE. Balanceamento de Carga. Restauração de Serviço. Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Otimização Combinatória.

ABSTRACT

Electric energy distribution systems can be reconfigured aiming at maintenance operations, reenergizing dark areas caused by storms or feeder load balancing. This work considers the network reconfiguration problem with the load balancing objective. It is also considered the particular case in which one wants to transfer load from a given feeder to its adjacent ones caused by maintenance operations or service restoration. It is presented a method for load balancing known as *Distance Measurement Technique (DMT)* applied to a multitier technique used to determine the switching operations involved. The flexibility and the effectiveness of the proposed method are proved in a practical test system.

KEYWORDS. Load Balancing. Service Restoration. Electric Distribution Systems. Combinatorial Optimization.

B.1 Introdução

O sistema de distribuição de energia elétrica recebe energia de subestações de transmissão e se responsabiliza por distribuí-la aos consumidores nos níveis de tensão requeridos. As redes primária e secundária compõem o sistema de distribuição, conforme a Figura (B.1). A rede de distribuição primária, ou de média tensão, parte diretamente da subestação rebaixadora atende aos consumidores de média tensão e alimenta os transformadores de distribuição, que por sua vez alimentam a rede de distribuição secundária, ou baixa tensão, suprindo os consumidores de baixa tensão.

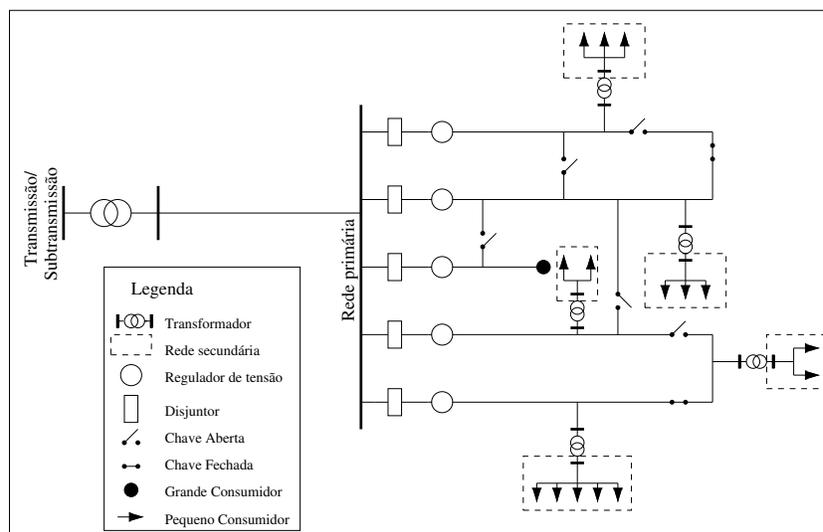


Figura B.1: Sistema de Distribuição.

Os sistemas de distribuição de energia são, na grande maioria, configurados de forma radial (árvore) com o propósito de facilitar fatores inerentes à proteção, tais como coordenação e atenuação de correntes de curto-circuito visando diminuir custos com equipamentos. Em geral, esses sistemas apresentam possibilidades de alteração da topologia radial, através da abertura/fechamento de chaves seccionadoras localizadas em pontos estratégicos. A alteração da topologia, mantendo-se a radialidade, é realizada de forma a atender vários propósitos: reduzir as perdas ativas nos alimentadores, melhorar o perfil de tensão para os consumidores, aumentar os níveis de confiabilidade e eliminar e/ou isolar faltas, restaurando o fornecimento de energia. Assim, estas chaves seccionadoras são utilizadas para ambos os objetivos: proteção (isolamento de faltas) e reconfiguração (gerenciamento de configuração).

Um número mínimo de intervenções ou chaveamentos na rede deve nortear qualquer

solução para o problema de reconfiguração, pelas seguintes razões:

- Alterar de forma substancial a topologia do sistema pode ocasionar a perda de sensibilidade do operador em função da difícil previsão dos impactos causados.
- O retorno à configuração original torna-se mais fácil.
- As operações de chaveamento geram perturbações que aumentam a possibilidade de danos aos equipamentos.
- A maioria dos chaveamentos é manual, o que pode requerer um tempo considerável para implementá-los.

Este trabalho considera o problema de reconfiguração da rede com o objetivo de balancear a carga dos alimentadores. Considera-se também, um caso particular, no qual há a necessidade de transferir carga de um determinado alimentador para os seus adjacentes por questões operativas, a fim de facilitar uma eventual manutenção ou até mesmo para reenergizar áreas “fora de serviço”. Tanto o Problema de Reconfiguração de Rede para Balanceamento de Carga como o de Restauração de Serviço são problemas relativos ao sistema de distribuição e envolvem a resolução de complexos problemas não lineares de otimização combinatória que em muitos casos requerem rapidez de execução por seu caráter emergencial, como é o caso da necessidade de restaurar energia depois de desligamentos ocasionados por tempestades.

Este trabalho propõe um método de balanceamento de carga e restauração de serviço em redes de distribuição radiais. As seções B.1.1 e B.1.2 apresentam uma revisão bibliográfica dos problemas de balanceamento de carga e de restauração de serviço, respectivamente. A seção B.2 contém a definição do problema, a seção B.3 apresenta o fluxo de potência utilizado, a seção B.4 define os índices de classificação e a técnica de multichaveamento necessários para o método utilizado, descrito na seção B.5. A seção B.6 descreve o algoritmo proposto e finalmente, os resultados computacionais e conclusão apresentadas na Seção B.7 e B.8, respectivamente.

B.1.1 Balanceamento de Carga

Na década de 80, Baran e Wu (1989) desenvolveram uma formulação geral e métodos de soluções para problemas de minimização de perdas e balanceamento de carga. O princípio

dos métodos que usam troca de ramos (do inglês *branch-exchange*) é buscar a melhor configuração segundo a função objetivo definida (balanceamento de carga ou redução de perdas), partindo-se de uma solução factível e sempre observando as restrições (tensão, capacidade da linha/transformador e confiabilidade). Dois métodos de fluxo de potência no sistema de distribuição foram utilizados: *Simplified DistFlow Method* e *Backward and Forward Update of DistFlow*.

Chiang e Jean-Jumeau (1990) definiram um problema de otimização não-diferenciável e multi-objetivo com restrições de igualdade e desigualdade para redução de perdas e balanceamento de carga. A metodologia é baseada em duas etapas de solução: uma técnica modificada de *simulated annealing* e o método ϵ -*constraint* para problemas de otimização multi-objetivo.

No trabalho de Hsu et al. (1993), um algoritmo de busca heurística baseado em algumas regras heurísticas foi proposto para alcançar a operação de chaveamento desejado que obtenha o balanceamento de carga entre transformadores/alimentadores. Os autores afirmam que a solução pode ser um mínimo local. Mais tarde, a fim de alcançar uma melhor solução, uma busca heurística refinada para o balanceamento de carga entre os alimentadores e transformadores (simultaneamente) foi proposta por Jwo-Hwu (1997).

O trabalho de Kashem et al. (1999) tem como objetivo principal minimizar o índice de balanceamento do sistema de distribuição, respeitando as condições mínimas de operação tais como radialidade, quedas de tensões, limites dos fluxos nas linhas e a capacidade dos alimentadores. A metodologia proposta é baseada no algoritmo chamado de *distance measurement technique* (DMT). A técnica desenvolvida elimina a necessidade de considerar a troca de ramos em outros *loops* do sistema e também reduz o número de execuções do fluxo de carga.

B.1.2 Restauração de Serviço

Na década de 80, Aoki et al. (1989) propõem um método gradiente dual efetivo para o problema de restauração de serviço. O novo algoritmo proposto restaura rapidamente as cargas desenergizadas no sistema de distribuição usando chaves seccionadoras. A restauração de serviço envolve energizar as cargas na parte isolada da rede, transferindo essas cargas para alimentadores adjacentes por meio de manobras das chaves seccionadoras.

Um método de busca sistemático foi desenvolvido por Wu et al. (1991) para identificar a opção de chaveamento factível respeitando a estrutura radial. Baseado na estrutura de busca

proposta, as regras heurísticas e as funções de avaliação são exploradas a fim de encontrar uma solução com o mínimo de operações de chaveamento e o balanceamento da carga do sistema.

Uma Busca Tabu Reativa é utilizada na operação de transferência de carga para restauração de serviço em Fukuyama (2000) e Toune et al. (1998a). Em Fukuyama (2000), tanto o problema de restauração de serviço como o problema de reconfiguração da rede visando redução de perdas, são resolvidos através de um método de Busca Tabu Reativa. Da mesma forma, o problema de restauração de serviço, tratado por Toune et al. (1998a) tem como objetivo equalizar a capacidade reserva de cada fonte de potência e maximizar a tensão mínima da rede, sujeito às restrições de limite de fornecimento dos alimentadores e de fluxo nas linhas, queda de tensão nos consumidores, e de radialidade.

Quando a área “fora de serviço” não pode ser restaurada somente pelas fontes de potência vizinhas, o multi-estágio é requisitado para aumentar esta capacidade. Para este problema, um sistema híbrido usando sistema especialista e Busca Tabu Reativa é proposto por Toune et al. (1998b).

O problema de restauração de serviço com prioridade de clientes é formulado como um problema multi-objetivo sujeito às restrições de operação e de engenharia (Miu et al., 1998). A função objetivo maximiza a carga prioritária restaurada, maximiza a carga total restaurada e minimiza o número de manipulações de chaves. As restrições consideradas são: radialidade, limites de fluxo, quedas de tensão e capacidade dos alimentadores. Miu et al. (1998) desenvolveram um método de busca baseado em quatro índices usados para diferenciar as chaves da rede: Distância Geográfica, Capacidade de Reposição, Distância Elétrica e Carga Transferível. Uma importante observação é que o algoritmo é executado de forma independente para cada área sem fornecimento, o que pode causar erros.

A seguir, Miu et al. (2000) apresentaram uma nova formulação incluindo o controle de bancos de capacitores e a transferência de carga em vários níveis a partir da região afetada. Os objetivos a otimizar são: maximizar a área total restaurada, maximizar a área total prioritária restaurada, minimizar o número de manipulações de chave, minimizar a distância geográfica e ainda minimizar o número de manipulações nos capacitores. As restrições operacionais tratadas são: limites de fluxo, de queda de tensão e de capacidade de alimentadores.

Recentemente, Garcia e França (2005) desenvolveram uma Busca Tabu multiobjetivo para o problema de restauração do serviço. O método desenvolvido tem como objetivo minimi-

zar a carga não restaurada e o número de operações de chaveamento envolvidas. As restrições consideradas são radialidade, limites de fluxo, quedas de tensão e capacidade dos alimentadores.

B.2 Formulação Matemática do Problema

Neste trabalho o problema de reconfiguração da rede de distribuição primária é formulado tendo como objetivo o balanceamento de carga entre os alimentadores. Este critério tem se mostrado relevante pelas concessionárias de energia elétrica por ter dupla utilidade: além de minimizar as perdas da rede ele também tem um caráter de aumentar a sua confiabilidade, dado que uma rede balanceada enfrenta melhor as eventuais contingências. O balanceamento pode se dar entre todos os alimentadores da rede de distribuição ou em algum em particular, onde exista a necessidade de transferir carga de um determinado alimentador para os demais, seja por questões operativas, manutenções ou para restauração de serviço de uma área “fora de serviço”.

A seguir é apresentada a formulação matemática do problema de reconfiguração de rede para transferência de cargas:

$$\text{Min } LB_{SYS} = \frac{1}{n_n} \sum_{i \in NF} \frac{S_i}{S_i^{max}} X_i + \frac{1}{n_n} \sum_{i \in NA} \frac{S_i}{S_i^{max}} X_i \quad (\text{B.1})$$

Sujeito a:

$$|V_k^{min}| \leq |V_k| \leq |V_k^{max}|, \quad \forall k \in N \quad (\text{B.2})$$

$$|I_i^{min}| X_i \leq |I_i^{max}|, \quad \forall i \in N \quad (\text{B.3})$$

$$\text{Capacidade dos alimentadores} \quad (\text{B.4})$$

$$\text{Balanço entre oferta e consumo} \quad (\text{B.5})$$

$$\text{Configuração radial} \tag{B.6}$$

Onde:

- LB_{SYS} é o índice de balanceamento de carga do sistema;
- A é o conjunto de arestas da rede;
- N é o conjunto de nós da rede;
- n_n é o número de nós da rede;
- S_i é o fluxo de Potência Complexa na aresta i ;
- S_i^{max} é a capacidade Máxima de Fluxo de Potência Complexa da aresta i ;
- NF é o conjunto de todas as chaves normalmente fechadas;
- NA é o conjunto de todas as chaves normalmente abertas;
- X_i é uma variável inteira que denota o uso da aresta i , $X_i = 1$, ou a ausência $X_i = 0$;
- V_k é a tensão no nó k ;
- V^{min} / V^{max} é a tensão mínima/máxima aceitável;
- I_i é a corrente na aresta i ;
- I_i^{max} é a corrente máxima aceitável.

O objetivo é otimizar o índice de balanceamento dos arcos do sistema, que mede o quanto um arco pode ser carregado sem exceder a respectiva capacidade máxima. Portanto, o modelo apresentado tem como objetivo minimizar o índice de carga média do sistema de distribuição, dado pela equação (B.1).

A variável de decisão do problema expressa a condição de cada aresta disponível. Com a definição de todas as chaves do sistema, o fluxo de carga determina o fluxo de potência nas arestas da rede, possibilitando a avaliação da violação ou não das restrições de limites de tensão (B.2), corrente (B.3) e capacidade dos alimentadores (B.4), de conservação do fluxo de potência nos nós da rede, dada pela equação (B.5), e de radialidade do sistema de distribuição (B.6). O modelo matemático apresentado nesta seção servirá como base teórica para o desenvolvimento do método proposto.

B.3 Fluxo de Potência em Redes de Distribuição

O método escolhido foi o fluxo de potência *Backward-Forward Sweep*, ou varredura vai e vem, proposto por Baran e Wu (1989). Embora este método não tenha o compromisso de fornecer a solução ótima para o problema de cálculo dos fluxos de potência, os valores fornecidos representam uma ótima aproximação considerando-se a relação qualidade/tempo computacional.

O algoritmo do método *Backward-Forward Sweep* consiste em dois passos básicos, a varredura *backward*, onde são calculadas as correntes ou fluxos de potência com as possíveis atualizações das tensões, e a varredura *forward*, que realiza os cálculos das quedas de tensão com as atualizações das correntes elétricas. Esses passos são repetidos até que se obtenha a convergência do algoritmo.

B.4 Índice de Classificação de Chaves e Multi-Chaveamento

B.4.1 Índice de Classificação de Chaves

No problema descrito é necessário estabelecer critérios para determinar entre as chaves da rede quais sofrerão manobras. Para isto, nesta seção dois índices são apresentados: *Spare Capacity* e *Transferable Load* (Miu et al., 1998; Miu et al., 2000). Esses índices são a base para a classificação, em um método de busca, das chaves da rede. Os dados utilizados para determinar os índices são valores obtidos pelo fluxo de carga, apresentado na Seção B.3.

O primeiro índice é uma medida de capacidade de fluxo livre. O fluxo de carga calcula o fluxo em cada ramo k , dado por I_k . Para cada ramo, entre a subestação e a chave normalmente aberta, I_k é comparado com a capacidade máxima, I_k^{max} , como mostra a equação (B.7). A máxima diferença I_M^k entre todos os ramos no caminho é a máxima capacidade das chaves.

$$I_M^k = I_k^{max} - I_k \quad (\text{B.7})$$

O segundo índice é a carga transferível para uma chave normalmente fechada. É definido como a quantidade de carga que cada chave normalmente fechada pode transferir para uma chave normalmente aberta, respeitando a capacidade da mesma. I_{SS} é computado como a soma

de todas as cargas abaixo da chave normalmente fechada, as quais pertence o conjunto C_d , conforme a equação (B.8).

$$I_{SS} = \sum_{C_d} I_L \quad (\text{B.8})$$

B.4.2 Multi-Chaveamento

Muitas vezes o problema de reconfiguração da rede é considerado para o caso no qual há a necessidade de transferir carga de um determinado alimentador para os seus adjacentes por questões operativas ou até mesmo para facilitar uma eventual manutenção. Neste caso, verifica-se se os alimentadores vizinhos podem suprir a capacidade das cargas a serem transferidas. Caso os alimentadores adjacentes não suportem a transferência da carga desejada, utiliza-se o multi-chaveamento.

As operações de chaveamento são feitas aos pares, para manter a estrutura radial da rede. A troca de ramos é executada através do fechamento de uma chave normalmente aberta, chave faca, e da abertura de uma chave normalmente fechada, chave seccionadora.

O Multi-Chaveamento (Miu et al., 2000) é então executado a partir de um alimentador origem escolhido, no qual o alívio de carga é desejado, até que sejam analisados todos os alimentadores ou a carga desejada tenha sido transferida. Considere os seguintes níveis, ou camadas de chaveamento:

- *Tier 1*: chaves facas incidentes no alimentador origem.
- *Tier 2*: chaves facas incidentes ao *Tier 1*.
- *Tier n*: chaves facas incidentes no *Tier n - 1*.

Se a capacidade do *Tier1* não é suficiente para aliviar a carga do alimentador origem, altos Tiers são considerados. As chaves do *Tier2* transferem cargas do *Tier1* para o *Tier2*, aumentando a capacidade do *Tier1* e possibilitando, então, o alívio de carga do alimentador origem. O processo é repetido até que seja executado o último Tier ou a capacidade desejada seja “liberada” para o *Tier1*, para que possa ser executada a transferência de carga do alimentador origem.

A seguir, apresentaremos alguns conceitos que serão utilizados pelo algoritmo proposto:

- Alimentador Origem: corresponde ao alimentador no qual se deseja transferir carga.
- Alimentador Adjacente: corresponde ao alimentador que está conectado ao alimentador origem por uma chave normalmente aberta.
- Alimentador Destino: corresponde ao alimentador que receberá a carga, total ou parcial, a ser transferida.
- Nó Fonte: corresponde ao nó pertencente ao alimentador origem com alguma interligação com outro alimentador.
- Ciclo: corresponde à malha formada pelo fechamento de uma chave aberta entre dois alimentadores.
- *Área Clara*: corresponde ao conjunto de consumidores que não teve interrupção no fornecimento de energia.
- *Área Escura*: corresponde ao conjunto de consumidores que ficou sem energia após o isolamento do defeito, ou seja, a área “fora de serviço”.
- Fronteira: corresponde a um nó fonte pertencente ao alimentador origem, que não pode ser transferido. Esta fronteira, por exemplo, pode estabelecer a conexão com uma *área escura*. Por isso deseja-se o alívio do alimentador ao qual ela pertence.
- Vetor Alimentador: corresponde ao vetor composto pelo conjunto de alimentadores no qual se deseja transferir carga.
- Vetor Alimentador Analisado: corresponde ao vetor composto pelo conjunto de alimentadores pertencente ao Vetor Alimentador a cada iteração, ou seja, corresponde a todos os alimentadores no qual foi desejada a transferência de carga.
- Vetor Alimentador Adjacente: corresponde ao vetor de alimentadores que está conectado ao alimentador origem, ou ao Vetor Alimentador, por uma chave normalmente aberta.

O problema de reconfiguração de rede com o objetivo de balancear cargas pode ser resolvido na rede toda, ou considerando o alívio em apenas um alimentador. Pode se tratar o problema impondo a transferência de carga de forma a minimizar o desbalanceamento, de

forma simples ou utilizando o multi-chaveamento. Também podemos considerar uma fronteira a ser preservada no alimentador origem.

B.5 Distance Measurement Technique (DMT)

Em busca de uma solução para o problema matemático apresentado na Seção B.2, alterações na topologia da rede serão executadas através de manobras de chaveamento guiadas por uma metodologia chamada *distance measurement technique* (DMT) e baseada no algoritmo de Kashem et al. (1999). Este algoritmo tem duas etapas fundamentais: na primeira encontra-se o ciclo que proporciona o maior balanceamento entre os alimentadores do sistema de distribuição segundo o índice ΔLB , que considera o nível médio de carregamento destes alimentadores. Na segunda etapa é escolhida a chave, para interromper o ciclo determinado na etapa anterior, que promova o maior balanceamento de carga dos alimentadores envolvidos, segundo o índice ΔDC . Este índice é obtido através da representação da potência ativa e reativa de cada ramo m envolvido no ciclo. Com esta representação planar (plano PxQ) pretende-se escolher aquela chave que promova o maior balanceamento de carga a partir da relação entre a carga transferida e o fluxo de carga resultante: aquela chave m com o menor ΔDC_{tm} será escolhida (Kashem et al., 1999).

Em uma rede radial diversos ciclos podem ser formados fechando-se as chaves normalmente abertas da rede. O número de ciclos é igual ao número de chaves normalmente abertas. A Figura (B.2) ilustra um ciclo criado através do fechamento da chave t .

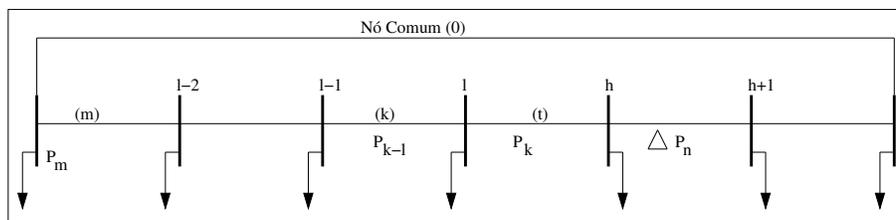


Figura B.2: Ciclo associado à chave normalmente aberta t .

Pela abertura da chave t , divide-se o ciclo em duas partes: a primeira é formada pelos ramos do nó 0 ao l , e a segunda do nó 0 ao h . Considere a troca de ramos entre t e m , onde t é a chave normalmente aberta e m é a chave normalmente fechada. A mudança no balanceamento de carga devido a troca de ramos $t - m$ é dada pela equação (B.9) (Kashem et al. (1999), Baran

e Wu (1989)).

$$\Delta LB_{tm}^S = 2P_m \left(\sum_{l \in F_o} k_l P_l - \sum_{h \in F_d} k_h P_h \right) + 2Q_m \left(\sum_{l \in F_o} k_l Q_l - \sum_{h \in F_d} k_h Q_h \right) - (P_m^2 + Q_m^2) k_{loop} \quad (\text{B.9})$$

onde P_m e Q_m são o fluxo ativo e reativo respectivamente, no ramo m (a ser removido), k_i é o inverso do quadrado da capacidade máxima do ramo i , k_{loop} é a soma dos valores de k para cada ramo no ciclo em que exista fluxo de potência, l representa o alimentador que transferirá carga e h o alimentador que receberá a carga a ser transferida.

Se o valor de ΔLB_{tm}^S é maior que zero o balanceamento de carga é melhorado, caso contrário o balanceamento de carga é deteriorado.

A seguir são apresentadas as duas etapas fundamentais do método DMT.

B.5.1 Determinação do ciclo com Máximo Balanceamento de Carga

Nesta técnica, a distância de vários pontos (P_m, Q_m) para o centro do círculo do ciclo (P_o, Q_o) é calculada. O círculo do ciclo é desenhado através da relação entre o balanceamento de carga ΔLB_{tm}^S e a potência transferida (P_m, Q_m) como ilustra a Figura (B.3). Dado um ramo k , como mostra a Figura (B.2), se o valor de ΔLB_{tk}^S é negativo, então não há ramo no ciclo candidato à troca de ramos. Se o valor de ΔLB_{tk}^S é positivo, há um ramo candidato a troca de ramos e este ramo melhora o valor de ΔLB_{tm}^S .

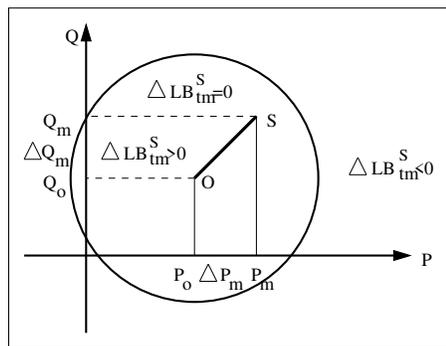


Figura B.3: Círculo do ciclo de Balanceamento de Carga nulo.

Vários círculos podem ser desenhados para todos os ciclos do sistema e o maior círculo dará o máximo balanceamento de carga entre todos os círculos desenhados para os ciclos da rede.

B.5.2 Determinação da opção de chaveamento para o balanceamento de carga

Depois de determinar o ciclo que dá o máximo de balanceamento de carga, distâncias de vários pontos (P_m, Q_m) para o centro do círculo do ciclo são calculadas para encontrar o ramo a ser trocado para o máximo melhoramento. A menor distância é considerada melhor para o máximo balanceamento de carga e é escolhida como candidata para a troca correspondente do ramo com a chave normalmente aberta.

O círculo da Figura (B.3) é chamado círculo do ciclo do balanceamento de carga nulo. A distância do ponto $S(P_m, Q_m)$ para o centro do círculo $O(P_o, Q_o)$ é dada pela equação (B.10).

$$\Delta DC_{tm} = \sqrt{\Delta P_m^2 + \Delta Q_m^2} \quad (\text{B.10})$$

onde $\Delta P_m = P_m - P_o$ e $\Delta Q_m = Q_m - Q_o$.

Como descrito, somente o ponto do centro do círculo pode maximizar o balanceamento de carga do ciclo, ou seja, o mínimo valor de ΔDC_{tm} representa o máximo valor de balanceamento de carga.

B.6 Algoritmo Proposto

O Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito com *Multi-Tier* tem como objetivo transferir um Carga desejado de forma a minimizar o índice de balanceamento do sistema de distribuição (Kashem et al., 1999), respeitando as condições mínimas de operação tais como radialidade, quedas de tensões, limites dos fluxos nas linhas e a capacidade dos alimentadores.

A função objetivo, dada pela equação (B.1), é calculada excetuando-se o alimentador origem. Isto porque o alimentador origem, só receberá um delta de carga após o balanceamento. Desta forma, o carregamento médio será calculado entre os outros alimentadores.

A Função Auxiliar, conforme Figura (B.4), apresenta o método base utilizado para determinar o ciclo, com o melhor índice ΔLB e identificar a chave a ser aberta, que interrompa o ciclo.

No passo 2 notamos que são considerados todos os ciclos entre os alimentadores do Vetor Alimentador e os alimentadores adjacentes, que não tenham sido analisados.

1. Calcular o fluxo de carga para obter o fluxo de potência em todos os ramos da rede.
2. Calcular o índice ΔLB para todos os ciclos entre os alimentadores do Vetor Alimentador e os alimentadores adjacentes, que não pertençam ao Vetor Alimentador Analisado.
3. Se não houver ΔLB positivo ou se a capacidade desejada foi transferida, pare. Caso contrário, vá para o passo 4.
4. Identificar o maior valor de ΔLB e selecione o ciclo que lhe deu origem.
5. Analisar I_M do alimentador destino.
6. Escolher a chave para abrir, cujo valor de $I_{ss} \leq I_M$.
7. Se todas as restrições forem satisfeitas, execute a manobra da chave e vá para o passo 1. Se não, exclua o ΔLB que deu origem ao ciclo escolhido e vá para o passo 4.

Figura B.4: Função Auxiliar.

No passo 5 é calculado o índice *Spare Capacity* para o alimentador destino, ou seja, para o alimentador que receberá um $\Delta Carga$. No passo 6 é escolhida a chave que deve ser aberta para interromper o ciclo escolhido na etapa anterior, utilizando o índice *Transferable Load*.

O critério de parada é incluído no passo 3, determinando que a partir de certa configuração não haverá manobras que promovam índices ΔLB positivos, ou que, a partir de uma configuração, a capacidade de carga transferida seja suficiente. Deseja-se obter um alívio $\Delta Carga$ no alimentador origem, e conseqüentemente, para os alimentadores de mais alto *Tier*. O fluxo de carga é calculado a cada manobra executada para que os fluxos de potência nos ramos sejam atualizados.

Na Figura (B.5) temos o Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito com Multi-Tier. Os passos 1-2 executam o algoritmo da Figura (B.4) para o alimentador origem, ou seja, o alimentador em que desejamos obter um alívio de carga.

Os passos de 3-6 executam a “subida” para os *Tiers* mais altos. O critério de parada é que a capacidade desejada tenha sido transferida ou que não haja mais alimentadores a analisar ou que o *Tier* seja superior a 3. A capacidade desejada é tida como a diferença entre o desejado e o obtido em outros *Tiers*.

Os passos de 7-9 executam a “descida” até o *Tier* 0. Em cada *Tier* verifica-se se houve um alívio no $Tier + 1$ e se com este alívio consegue-se transferir carga neste *Tier*. Conseqüentemente, quando retornamos ao *Tier* 0, verifica-se as novas possibilidades de transferência de carga do alimentador origem. O critério de parada final é incluído no passo 10, verificando se o alívio desejado no alimentador origem foi obtido ou se a variação de carga transferida a cada

1. Executa o algoritmo Função Auxiliar para o alimentador origem.
2. Atualiza o Vetor Alimentador, Vetor Alimentador Analisado e o Vetor Alimentador Adjacente.
3. Se a capacidade desejada foi transferida ou se não há mais alimentadores a serem analisados ou se Tier>4, vá para o passo 7.
4. Executa o algoritmo Função Auxiliar para o Vetor Alimentador.
5. Atualiza o Vetor Alimentador, Vetor Alimentador Analisado e o Vetor Alimentador Adjacente.
6. Incrementa Tier e vá para o passo 3.
7. Executa o algoritmo Função Auxiliar para o Vetor Alimentador da iteração Tier - 1, até Tier=0. Se Tier=0, vá para passo 10.
8. Atualiza o Vetor Alimentador, Vetor Alimentador Analisado e o Vetor Alimentador Adjacente.
9. Decrementa Tier e vá para o passo 7.
10. Se a variação de carga transferida for menor que uma tolerância ou se a capacidade desejada foi transferida, pare. Se não, vá para o passo 1.

Figura B.5: Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito Modificado *Multi-Tier*.

iteração é menor que uma dada tolerância. O fluxo de carga é calculado a cada rotina da Função Auxiliar a cada manobra executada para que os fluxos de potência nos ramos sejam atualizados.

B.7 Resultados

Para avaliar experimentalmente os algoritmos propostos foram utilizadas três redes de distribuição de diferentes dimensões variando de pequenas, com algumas dezenas de chaves e barras de carga, até grandes, com algumas centenas de chaves e alguns milhares de barras de carga. A tabela (B.1) apresenta as três redes: a rede 1 foi obtida do trabalho de Augugliaro et al. (1998) e as outras duas redes são sistemas reais e foram obtidas de uma concessionária brasileira. Cada rede é caracterizada pelas informações sobre o número de subestações, nós, arcos, chaves, alimentadores, barras de carga e potência ativa total (kW).

Para o caso de reconfiguração da rede com transferência de carga de um determinado alimentador (denominado alimentador origem) para os adjacentes, por questões operativas ou até mesmo para facilitar uma eventual manutenção, o valor de LB_{SYS} é calculado desconsiderando o alimentador origem. Esta medida é adotada para que não aconteça uma interpretação errônea dos índices. Tanto o carregamento quanto a capacidade livre do alimentador origem, após a transferência de carga, estarão destoantes dos outros alimentadores do sistema até que

haja a conexão da área que se encontra “fora de serviço”.

	Redes de Distribuição		
	1	2	3
Número de Subestações	6	1	1
Número de Nós	92	1.057	2.645
Número de Arcos	115	1.078	2.680
Número de Chaves	115	63	262
Número de Alimentadores	7	3	11
Número de Barras	75	417	716
Potência Ativa Total (kW)	28.621	11.542	42.664

Tabela B.1: Redes de distribuição empregadas nos testes computacionais.

Vários testes foram feitos para avaliar a qualidade dos algoritmos propostos. Os tempos de execução apresentados nos testes foram medidos em um computador AMD Sempron 2800+ com 1.60 GHz, 512 Mbytes de memória RAM e sistema operacional Windows. O algoritmo foi desenvolvido na linguagem C++, utilizando-se o compilador GNU g++.

Para todos os resultados é apresentado o valor inicial e final da função objetivo, LB_{SYS} , calculado com a função descrita na Seção B.2. Considere que o valor de $\Delta Carga$ desejado considerado nas simulações é de 0,075 para as redes 1 e 2 e de 0,006 para a rede 3. As unidades das grandezas, como LB_{SYS} , $LB_{SYS_INICIAL}$ e $\Delta Carga$, são descritas em p.u., ou por unidade. O valor por-unidade de qualquer quantidade é definido como a relação da quantidade pelo valor de uma base pré-definida, expressa como um decimal.

A Tabela (B.2) traz os resultados para a rede 1. A partir deles é possível concluir que o alimentador 54 foi o único que realizou transferência de carga em *Multi-Tier*. No *Tier 0* verifica-se que houve transferência de carga de 0,0641 pu para o alimentador 30. Como o valor transferido é menor que o desejado, passa-se ao *Tier 1*. No *Tier1* nota-se a transferência de 0,0770 pu do alimentador 30, adjacente ao alimentador origem, para o alimentador 2. Quando retorna-se ao *Tier 1* há uma nova transferência de carga do alimentador 54 para o 30, que foi aliviado no *Tier* anterior. Assim temos uma transferência de carga total de 0,2096 pu do alimentador 54. Nas outras simulações obtém-se a transferência do $\Delta Carga$ desejado com

**MULTI-CHAVEAMENTO PARA RESTAURAÇÃO DE SERVIÇO E
BALANCEAMENTO DE CARGA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
118 ELÉTRICA**

apenas um *Tier*. Percebemos que para que o alívio de carga ocorresse houve uma pequena piora no valor da função objetivo.

Alimentador	Tier	Chaveamento	$\Delta Carga$	$LB_{SYS_INICIAL}$	LB_{SYS}	Tempo
14-2	0	18-17	0,0781	0,0269	0,0270	0,062
70-42	0	76-77	0,0855	0,0279	0,0285	0,296
54-30	0	42-46	0,0641	0,0273	0,0272	
30-2	1	35-37	0,0770	0,0272	0,0272	0,062
54-30	0	53-54	0,1455	0,0272	0,0274	
30-2	0	35-37	0,0773	0,0274	0,0273	0,062

Tabela B.2: Resultados da Aplicação de Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito com Multi-Tier na Rede 1.

Tanto na Tabela (B.2) quanto na Tabela (B.4) temos resultados onde o valor final é maior que o inicial. Em decorrência da necessidade de transferência de carga desde alguns alimentadores, o efeito indesejado é a deterioração no índice de balanceamento. Na Tabela (B.4), é possível observar que tal deterioração é proporcional à carga transferida, ou seja, quanto maior a carga definida para transferência, maior poderá ser a deterioração no índice de balanceamento.

Alimentador	Tier	Chaveamento	$\Delta Carga$	LB_{SYS}	$LB_{SYS_INICIAL}$	Tempo
1012-1096	0	1036-1047	0,1627	0,0400	0,0345	2,156
1096	0	-	-	0,0558	0,0558	
1058-1012	1	1045-1067	0,0857	0,0558	0,0560	1,453
1096-1058	0	1124-1143	0,1556	0,0560	0,0541	
1058-1096	0	1124-1094	0,1230	0,0513	0,0508	0,906

Tabela B.3: Resultados da Aplicação de Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito com Multi-Tier na Rede 2.

Pela tabela (B.3) percebe-se que houve transferência de carga por *Multi-Tier* para o alimentador 1096. Percebe-se que no *Tier* 0 não houve possibilidade de transferência de carga para o alimentador origem. No *Tier* 1 acontece a transferência de carga do alimentador 1058, que é adjacente ao alimentador origem. Esta transferência proporciona o alívio do alimentador

origem, que executa uma transferência de carga para o alimentador 1058. Nas outras simulações obtém-se a transferência do $\Delta Carga$ desejado com apenas um *Tier*. Percebemos que o alívio de carga proporciona uma melhora no valor da função objetivo.

Alimentador	Tier	Chaveamento	$\Delta Carga$	LB_{SYS}	$LB_{SYS,INICIAL}$	Tempo
2404-2411	0	2726-31	0,3331	0,1170	0,1213	4,953
2544-2425	0	2727-2541	0,0223	0,1344	0,1341	4,984
2558-2600	0	2552-2555	0,1059	0,1292	0,1290	5,234
2581	0	-	-	0,1252	0,1252	6,625
-	1	-	-	0,1252	0,1252	
2404-2411	2	2726-31	0,3331	0,1252	0,1216	
2624-2404	1	2725-1805	0,0292	0,1216	0,1208	
2581-2624	0	2724-2583	0,0532	0,1208	0,1216	
2624	0	-	-	0,1321	0,1321	
2404-2411	1	2726-31	0,3331	0,1321	0,1287	5,531
2624-2404	0	2725-1805	0,02917	0,1287	0,1287	

Tabela B.4: Resultados da Aplicação de Algoritmo de Balanceamento de Carga Restrito com Multi-Tier na Rede 3.

A partir da Tabela (B.4) percebe-se que temos duas simulações com uso de transferências via *Tier*. A primeira é do alimentador 2581, que no *Tier* 0 não transferiu carga. No *Tier* 1, os alimentadores que são adjacentes ao 2581, também não transferiram carga. Já no *Tier* 2, houve a transferência de 0,03331pu carga do alimentador 2404 para o alimentador 2411. O alimentador 2404 é adjacente ao alimentador que é adjacente ao alimentador origem, neste caso o 2581. Retornando ao *Tier* 1, temos a transferência de 0,0292pu de carga do alimentador 2624 para o alimentador 2404, permitindo assim, a transferência de carga do alimentador origem 2581 para um alimentador adjacente 2624. Houve uma melhora no valor da função objetivo com a transferência de carga entre os alimentadores.

B.8 Conclusões

Este artigo propõe um método para o problema de reconfiguração de rede para balanceamento de carga, a fim transferir carga de um determinado alimentador aos seus adjacentes por questões operativas, para facilitar uma eventual manutenção ou até mesmo para reenergizar

áreas “fora de serviço” (Restauração de Serviço). O uso de multichaveamento possibilita uma melhor avaliação das soluções factíveis, proporcionando assim o alívio de carga no alimentador desejado.

Os resultados obtidos mostram que o método DMT proposto, identifica a operação de chaveamento de boa qualidade para otimizar o balanceamento de carga do sistema, com um baixo esforço computacional. Os resultados das simulações para as redes propostas mostram a eficiência do método empregado: melhores índices de balanceamento são obtidos quando se quer apenas equalizar o carregamento dos alimentadores; a transferência de carga é viabilizada através do multichaveamento em situações de manutenção da rede ou mesmo em condições de restauração do serviço.

Como um aspecto favorável do algoritmo desenvolvido é possível citar o baixo tempo computacional requerido. As contribuições deste trabalho incluem o desenvolvimento de um modelo para o problema de balanceamento de carga e restauração de serviço, utilizando o método de DMT; uma metodologia versátil que contempla cenários de melhoria do balanceamento do sistema e transferência de carga para manutenção da rede ou restauração do serviço e a inclusão da técnica de multichaveamento na metodologia desenvolvida. Os trabalhos futuros incluirão testes com outras redes.

B.9 Referências

Aoki, k., Nara, k., Itoh, M., Satoh, T. and Kuwabara H. (1989), A new algorithm for service restoration in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(3): 1832-1839.

Augugliaro, A., Dusonchet, L. and Sanseverino, E. R. (1998), Service Restoration in compensated distribution networks using a hybrid genetic algorithm. *Electric Power Systems Research*, 46: 59-66.

Baran, M. E. e Wu F. F. (1989), Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing. *Transactions on Power delivery*, 4(2): 1401-1407.

Chiang, H. D. and Jean-Jumeau, R. (1990), Optimal Network Reconfigurations in Distribution Systems. Part I: A New Formulation and A Solution Methodology. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5(4): 1902-1909.

Fukuyama, Y. (2000), Reactive Tabu Search for Distribution Load Transfer Operation. *Power*

Engineering Society Winter Meeting, IEEE, Singapore, Vol. 2, pp. 1301-1306.

Garcia, V. J. and França, P. M. (2005), Multiobjective Tabu Search for Service Restoration in Electric Distribution Networks. *Proceedings of the 2005 IEEE, St.Petersburg PowerTech*, 7 pages.

Hsu Y.-Y., Jwo-Hwu Y., Liu, S. S., Chen, Y. W., Feng, H. C. and Lee, Y. M. (1993), Transformer and Feeder Load Balancing Using a Heuristic Search Approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(1): 184-190.

Jwo-Hwu, Y. (1997), The refined strategy for substation main transformer and feeder load balancing. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 19(2): 87-91.

Kashem, M. A., Ganapathy, V. and Jasmon, G. B. (1999), Network Reconfiguration for Load Balancing in Distribution Network. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 146(6): 563-567.

Miu, K. N., Chiang, H. D., Yuan, B. and Darling, G. (1998), Fast Service Restoration for Large-Scale Distribution Systems with Priority Customers and Constraints. *IEEE Transactions on Power Systems*, 13(3): 789-795.

Miu, K. N., Chiang, H. D. and McNulty, R. J. (2000), Multi-Tier Service Restoration Through Network Reconfiguration and Capacitor Control for Large-Scale Radial Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(3): 1001-1007.

Toune, S., Fudo, H., Genji, T., Fukuyama Y. and Nakanishi Y. (1998a), A Reactive Tabu Search for Service Restoration in Electric Power Distribution Systems. *IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, Anchorage Alaska, pp. 763-768.

Toune, S., Fudo, H., Genji, T., Fujita, N., Fukuyama Y. and Nakanishi Y. (1998b), Hybrid Reactive System for Service Restoration in Distribution Systems using Expert System and Reactive Tabu Search. *IEEE International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 4 pages.

Wu J. S., Tomsovic K. L. and Chen, C. S. (1991), A Heuristic Search Approach to Feeder Switching Operations for Overload, Faults, Unbalanced Flow and Maintenance. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 6(4): 1579-1585. Overload, Faults, Unbalanced Flow and Maintenance. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 6(4): 1579-1585.