

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

1210001099



Nº 25

RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA PARA PLANEJAMENTO DA
OPERAÇÃO

ALUNO: FERNANDO CASARI

ORIENTADOR: JOSÉ ROBERTO SANCHES MANTOVANI

Te.1099



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

"RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA PARA PLANEJAMENTO DA
OPERAÇÃO"

1210001099



Proc. 054/99 - NPD 109

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"	
SERVIÇO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA 13/9/99	DATA DE TOMBO 30/9/99
RECEBIMENTO Lilia	TOMBO 1099
AQUISIÇÃO Deacap. Autor	CLASSIFICAÇÃO C335r

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica (ME).

ALUNO : FERNANDO CASARI
ORIENTADOR : JOSÉ ROBERTO SANCHES MANTOVANI
CO-ORIENTADOR : RUBÉN AUGUSTO ROMERO LÁZARO

ILHA SOLTEIRA, AGOSTO DE 1998.



"RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA PARA PLANEJAMENTO DA
OPERAÇÃO"

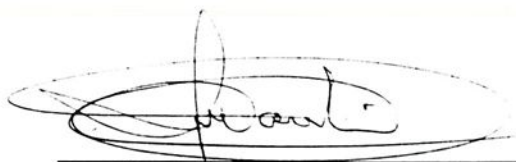
Fernando Casari

*Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP
como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica (ME).*



CARLOS ROBERTO MINUSSI – COORDENADOR

BANCA EXAMINADORA



JOSÉ ROBERTO SANCHES MANTOVANI – ORIENTADOR

ARIOVALDO VERANDIO GARCIA – FEE - UNICAMP

RUBÉN AUGUSTO ROMERO LÁZARO – CO-ORIENTADOR

Ilha Solteira - SP, Agosto de 1998

*Para ser grande, sê inteiro: nada
Teu exagera ou exclui.
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és
No mínimo que fazes.
Assim em cada lago a lua toda
Brilha, porque alta vive.*

Fernando Pessoa



AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador José Roberto Sanches Mantovani, um agradecimento em especial. Pela sua competência e disposição estando sempre presente em todos os momentos não medindo esforços para que esse trabalho fosse concluído. Também por sua amizade e compreensão.

Ao meu co-orientador Rubén Romero Augusto Lázaro por sua disposição e competência sempre presentes nos momentos de dúvida.

Ao professor Carlos Roberto Minussi pelo seu bom humor e amizade compartilhados diariamente e incentivo no cultivo da amizade entre colegas e professores.

A todos os colegas e em especial aos amigos Edmárcio Antonio Belati e Adenice D. S. T. dos Santos pela convivência harmoniosa e prestatividade.

Aos meus pais Adair Casari e Sônia Ap. Torres Gomes Casari pelo apoio total, sem o qual não seria possível ter chegado a mais uma etapa vencida em minha vida.

À minha namorada Celeste Marina Ravazzi pela sua paciência e carinho em todos os momentos.

A todos os professores e funcionários que continuam lutando para que o curso melhore a cada dia e não esmorecem diante das dificuldades, formando aqui, não apenas profissionais capacitados na especialidade em engenharia, mas pessoas incentivadas ao trabalho em grupo e ao bom relacionamento humano.

À Gerência Central de Atendimentos da CESP de Andradina-SP pela receptividade e disposição no fornecimento de dados para a realização de testes neste trabalho.



APOIO FINANCEIRO

Este trabalho contou com o apoio financeiro da FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.



RESUMO

Neste trabalho é apresentado um algoritmo heurístico que realiza a reconfiguração de redes de distribuição para planejamento da operação, visando a obtenção de um conjunto de configurações que apresentem as menores perdas ativas nos alimentadores, para serem usadas como estratégias de operação. O procedimento heurístico utilizado para encontrar as configurações com menores perdas é baseado no critério de limite máximo de queda de tensão permitido nos alimentadores e no balanço de carga entre os alimentadores. Para auxiliar o processo heurístico foi implementado um método aproximado e rápido para o cálculo de fluxo em redes radiais.

O algoritmo desenvolvido foi implementado em linguagem de programação Fortran (Fortran Visual Workbench v 1.0) e apresenta resultados para três sistemas hipotéticos amplamente divulgados e conhecidos na literatura especializada e um sistema real. Os três sistemas hipotéticos são de 14 barras [1], 32 barras [8] e 69 barras [14]. O sistema real é o sistema de distribuição de energia elétrica da cidade de Três Lagoas – MS, do Sistema CESP. Seus dados completos encontram-se no Apêndice – A.

ABSTRACT

In this work it is presented an heuristic algorithm that carry out the distribution networks reconfiguration for operation planning in order to obtain a configuration set whose configurations have the smallest active losses on its feeders to be used like operation strategies. To obtain the configurations, it is used an approached radial load flow method and a heuristic proceeding based on maximum limit of voltage drop on feeders and feeders load balancing.

The developed algorithm was implemented in Fortran programming language (Fortran Visual Workbench v 1.0). The results are presented for three hypothetical systems largely known which data are available in specialized literature and a real system. The three hypothetical system are 14-bus [1], 32-bus [2] and 69-bus [8] and the real system is a 135-bus.

ÍNDICE

CAPÍTULO I	1
INTRODUÇÃO.....	1
 CAPÍTULO II.....	 9
O PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	9
2.1 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	9
2.2 - FLUXO DE CARGA EM REDES RADIAIS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	12
2.2.1 - Forward Update DistFlow	12
2.2.2 - Backward Update DistFlow.....	16
2.2.3 - Processo Iterativo Aproximado 1 [6].....	17
2.2.4 - Processo Iterativo Aproximado 2 [12].....	19
 CAPÍTULO III	 24
METODOLOGIA DESENVOLVIDA	24
3.1 - INTRODUÇÃO	24
3.2 - MÉTODO DE TROCA DE RAMOS ("BRANCH-EXCHANGE") PARA A OBTENÇÃO DE NOVAS CONFIGURAÇÕES	26
3.3 - ALGORITMO DE BUSCA DE CONFIGURAÇÕES RADIAIS	27
3.4 - TÉCNICA DE CORTE DA CONFIGURAÇÕES	30
3.5 - MÉTODO APROXIMADO DE QUEDA DE TENSÃO	38
3.6 - COEFICIENTE DE BALANÇO DE CARGA.....	41
3.7 - O ALGORITMO	44

CAPÍTULO IV.....	48
RESULTADOS OBTIDOS.....	48
4.1 - INTRODUÇÃO	48
4.2 - TESTES REALIZADOS COM O CRITÉRIO DE CORTE DE CONFIGURAÇÕES PELA QUEDA DE TENSÃO	49
4.2.1 - Sistema de 14 Barras [1].....	49
4.2.2 - Sistema de 32 Barras [2].....	51
4.2.3 - Sistema de 69 Barras [8].....	52
4.2.4 - Sistema Real (CESP - Três Lagoas) de 135 Barras.....	54
4.3 - TESTES REALIZADOS COM OS COEFICIENTES DE BALANÇO DE CARGA ..	57
4.3.1 – Resultados dos testes com o CBC-01	57
4.3.2 - Resultados dos testes com o CBC-02	60
4.3.3 - Resultados dos testes com o CBC-03	63
CONCLUSÕES.....	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
APÊNDICE A	72
SISTEMAS TESTADOS	72
A.1 – DADOS COMPLETOS DO SISTEMA DE 14 BARRAS	73
A.2 – DADOS COMPLETOS DO SISTEMA DE 32 BARRAS	74
A.3 – DADOS COMPLETOS DO SISTEMA DE 69 BARRAS	76
A.4 – DADOS COMPLETOS DO SISTEMA DE 135 BARRAS	79
APÊNDICE B.....	85
ARTIGOS PUBLICADOS.....	85
B.1 – ARTIGO 01	86
B.2 – ARTIGO 02.....	92

CAPÍTULO I

Introdução

As redes de distribuição de energia elétrica são em sua grande maioria operadas radialmente. As redes radiais têm algumas vantagens sobre as redes malhadas tais como baixas correntes de curto-circuito, equipamento de proteção e chaveamento simples, conseqüentemente, baixos custos de manutenção, construção e operação. Por outro lado a estrutura radial por si só fornece baixa confiabilidade global. Portanto, para fazer uso dos benefícios da estrutura radial e ao mesmo tempo contornar as dificuldades decorrentes do baixo índice de confiabilidade, os sistemas de distribuição são construídos com chaves de interconexão localizadas em pontos estratégicos que sob diferentes condições de operação podem ser usadas tanto para a proteção (isolamento de faltas) quanto para o gerenciamento da topologia da rede (reconfiguração). A reconfiguração pode ser realizada pela mudança do estado (aberta/fechada) das chaves da rede de tal modo que a radialidade é sempre restabelecida depois de feitas as manipulações.

A reconfiguração de sistemas de distribuição pode ser usada como ferramenta de planejamento bem como ferramenta de controle em tempo real. A operação "on-line", ou em tempo real, requer respostas rápidas para que possam ser

tomadas as devidas ações de controle no comando automático dos sistemas visando a restauração dos serviços pelo isolamento de zonas de fornecimento com defeitos do tipo curto-circuito ou mesmo o balanceamento de carga entre alimentadores visando redução de perdas e conseqüente melhoramento dos níveis de tensão. Já no planejamento da operação o tempo para obtenção das respostas não assume um papel tão importante quanto no caso anterior. Nesse caso busca-se um conjunto de configurações com vistas a obter uma estratégia ótima de operação com minimização de perdas e atendimento da demanda diária com boa qualidade de serviço (perfil adequado da magnitude das tensões, confiabilidade, etc.), além da redução dos custos de operação.

A modificação da topologia da rede de tempos em tempos pela reconfiguração transferindo cargas de um alimentador para outro pode melhorar de modo significativo as condições de operação de todo o sistema. Essa modificação pode ocorrer diariamente em horários de pico, semanalmente em conseqüência do consumo irregular durante os dias da semana ou ainda de acordo com a sazonalidade. Como os alimentadores dos sistemas de distribuição possuem diferentes tipos de cargas (residencial, comercial, industrial, etc.), os picos de carga em transformadores, alimentadores individuais, ou em partes de alguns alimentadores ocorrem em horários diferentes possibilitando a transferência de carga de um alimentador ou transformador mais carregado para um outro relativamente menos carregado de modo que o remanejamento de cargas seja eficiente no melhoramento do perfil de tensão de toda a rede com significativa redução nas perdas globais do sistema de distribuição de energia elétrica. De modo geral a reconfiguração é realizada com vistas a reduzir as perdas ativas nos alimentadores, melhorar o perfil de tensão para os consumidores, aumentar a confiabilidade e eliminar ou isolar faltas restaurando o fornecimento de energia, isto é, buscar uma condição ótima de operação das redes de distribuição sem nenhuma violação nos limites de carregamento dos ramos e do limites de queda de tensão.

O problema de reconfiguração, por suas características, pode ser formulado como um problema de otimização não-linear com variáveis inteiras e reais cuja solução exata envolve a seleção entre todas as configurações possíveis daquela que



tenha o menor valor de perda e satisfaça todas as restrições de operação, inclusive a radialidade da rede.

Baseadas nestas características são encontradas na literatura duas abordagens para a solução do problema:

- (1) Utilização de técnicas de otimização convencionais baseadas em algoritmos do tipo "branch-and-bound";
- (2) Utilização de métodos de busca estatística de otimização combinatorial.

Os algoritmos de busca do tipo "branch and bound" partem de uma configuração inicial, fazendo um desdobramento da mesma e encontrando várias outras configurações que são sondadas e novamente desdobradas e sondadas, até que não se tenha mais opções de chaveamento. Porém, esse tipo busca examinando-se todas as configurações possíveis é exaustivo e impraticável para sistemas reais, em consequência do grande número de possibilidades de configurações geradas pelos chaveamentos, que cresce de forma exponencial. O fato do crescimento exponencial do número de possibilidades de configurações do sistema é denominado explosão combinatorial.

Para evitar a explosão combinatorial a maioria das técnicas e/ou metodologias procura estabelecer critérios que possam ser usados para eliminar opções indesejáveis de chaveamento para diminuir a dimensão do problema, objetivando reduzir o espaço de busca. O espaço de busca que pode ser definido como o conjunto de todas as configurações factíveis é reduzido por meio de regras definidas pela experiência de profissionais que atuam direta ou indiretamente na área, tornando a busca possível em tempo finito num espaço de busca também finito. A qualidade da solução a redução do espaço de busca por técnicas heurísticas depende significativamente da qualidade das regras utilizadas.

Objetivando reduzir o espaço de busca através de regras heurísticas, muitos autores têm apresentado propostas para a solução do problema de reconfiguração de redes de distribuição. A reconfiguração de alimentadores proposta por Cinvalar et al



em [1], foi desenvolvida para ser utilizada como ferramenta tanto de planejamento como de controle em tempo real (operação "on-line") na reestruturação de alimentadores primários objetivando a redução de perdas. O método de solução proposto por [1] tem a capacidade de estimar com mínimo esforço computacional a mudança nas perdas, resultado da reconfiguração dos alimentadores utilizando como critério para reduzir o número de configurações candidatas, uma fórmula interessante e de uso simples que exclui opções indesejadas de chaveamentos sem a necessidade de se efetuar numerosos cálculos de fluxo de potência, reduzindo significativamente o esforço computacional. Baran et al [2] tratam do problema de reconfiguração de redes em sistemas de distribuição para redução de perdas e balanceamento de cargas utilizando a aproximação proposta por Cinvalar et al [1] para abertura dos laços quando da realização das operações de chaveamento para a reconfiguração da rede. Entretanto, introduzem dois diferentes métodos de cálculo de fluxo de carga para redes radiais, com variados graus de precisão, para calcular o estado da rede depois da transferência de uma carga entre duas subestações, alimentadores, ou ramos. Os métodos desenvolvidos usam um novo conjunto de equações de fluxo de potência que foram desenvolvidos especialmente para alimentadores radiais de distribuição e usado no problema de locação de capacitores pelo mesmo autor em [13]. Os métodos podem ser usados para sistemas que não são bem compensados por que os fluxos de potência reativa são explicitamente incluídos nas equações. A idéia básica do esquema de busca é partir de uma configuração factível, fechar no primeiro nível as chaves abertas uma a uma, abrindo para cada laço formado o ramo que dá a maior redução de perdas. Então é escolhida a configuração que pela troca de um ramo tem a maior redução de perdas. A configuração escolhida passa para o próximo nível e o processo é repetido até que não haja mais redução de perdas. Como pode ser notado, a busca não examina todas as possibilidades e dessa maneira não se garante que seja um ótimo global. Ainda nessa linha de pesquisa para a operação on-line Morelato et al [4] apresentam em seu trabalho uma estratégia de busca equipada com regras práticas (baseadas na experiência do operador) para resolver problemas como serviço de restauração e reconfiguração de sistemas. Para resolver o problema os autores usam um processo de busca heurística em árvore de decisão binária, que permite percorrer o espaço de possibilidades do estado do sistema, enquanto que o conhecimento de domínio específico é essencial para limitar o

tamanho da árvore de decisão, evitando uma explosão combinatorial mantendo o problema dentro de um tamanho gerenciável. A reconfiguração de redes de distribuição proposta por Borozan et al [7] também utiliza um método heurístico para determinar uma configuração com mínimas perdas resistivas nas linhas para aplicação em tempo real. A metodologia proposta é similar a [6], em que se parte com todas as chaves do sistema sendo fechadas, as cargas são convertidas em correntes nodais usando-se as tensões nodais. Borozan et al [7] dão um enfoque na ordenação e numeração dos nós da rede, afirmando que isto é de grande importância para a eficiência da maioria dos métodos para cálculo de fluxo de carga em redes radiais. Este trabalho acrescenta aos trabalhos desenvolvidos na área com metodologias similares à formação da matriz impedância de laço, reordenação parcial dos ramos da rede depois de chavear um ramo que pertence a um ou mais laços e reavaliação da matriz impedância de laço.

Na linha de pesquisa voltada para o planejamento da operação Gallego et al [3] apresentam um método aproximado de reconfiguração de redes de distribuição com o objetivo de diminuir as perdas do sistema. Esta metodologia gera a partir de uma configuração radial inicial um conjunto de configurações radiais num processo de expansão tipo árvore de "branch-and-bound". No início do processo são geradas a partir da configuração inicial, novas configurações que são adicionadas a uma lista de soluções incumbentes de tamanho reduzido. Quando o conjunto estiver completo, uma nova configuração candidata é adicionada ao conjunto se a mesma tiver perda menor de que alguma configuração já incluída no conjunto e passar por um critério de sensibilidade e um teste de fluxo ótimo de corrente no laço correspondente ao ramo de ligação. Assim, no final do processo tem-se um conjunto de configurações como opções de operação. Taleski et al [5] também direcionam seu trabalho de reconfiguração de redes visando determinar a configuração com mínima perda para um dado período para encontrar opções para operação. O método proposto é baseado em várias características favoráveis de métodos e técnicas desenvolvidos especialmente para análise de redes radiais - ordenação orientada dos elementos da rede, método de soma de potência para fluxo de potência e representação estatística da variação de carga. O método é do tipo "branch exchange" que analisa os laços formados na rede pelo fechamento de uma chave que estaria aberta em condições normais de operação e troca os ramos para obter



uma nova configuração radial. O ramo candidato a ser aberto é escolhido usando uma técnica parecida com a de Cinvalar [1], mas aplicado o conceito de perda de energia (Kwh) e não perda de potência(KW). O modo como os laços são analisados e reconfigurados é determinado por regras heurísticas definidas para carga e tensão que variam com o tempo. O trabalho de Shirmohammadi et al [6] também apresenta um método heurístico para reconfiguração de redes de distribuição para reduzir as perdas resistivas nas linhas sob condições normais de operação. Neste método parte-se de uma configuração radial inicial e fechando-se todas as chaves abertas da rede, obtém-se uma rede fracamente malhada. As cargas são convertidas em injeções de corrente nodais, usando os valores das tensões nos nós. Então se processa um fluxo de potência para redes malhadas e são escolhidas para serem abertas as chaves que conduzem as correntes mais baixas. Também é verificado se a configuração é radial e se todas as cargas estão conectadas. Caso contrário repetem-se os processos até que se encontre a configuração com mínimas perdas. Merlin & Back [15] também usaram um algoritmo tipo "branch and bound" em um método que parte com todas as chaves fechadas para formar uma rede malhada e então as chaves são abertas sucessivamente, após passarem por um critério de escolha visando a minimização de perdas, para restaurar a configuração radial. Shirmohammadi & Hong [6] baseados no método desenvolvido por [15] sugeriram um algoritmo heurístico, em que o processo de solução também parte com todas as chaves do sistema fechadas e depois são abertas uma a uma para estabelecer o fluxo ótimo da rede. Neste algoritmo foram sugeridas várias aproximações para o método proposto por [15].

Recentemente, técnicas de otimização combinatória de natureza estatística tais como Simulated Annealing – S.A. (Recozido Simulado) – e Genetic Algorithms – G.A. (Algoritmos Genéticos) – têm despertado interesse de pesquisadores para resolver problemas do mundo real por causa da flexibilidade e eficiência apresentadas por esses métodos. A principal vantagem do SA está situada em seu potencial de encontrar a solução ótima global. Esta técnica tem se mostrado convergir assintoticamente para a solução ótima global com probabilidade um, sob certas condições. Entretanto, como o problema cresce com o tamanho do sistema, o tempo computacional requerido para encontrar uma solução próxima do ótimo global pode



impedir seu uso em aplicações a sistemas de potência reais. Em contraste, o GA pode aproximar o ótimo global do problema de otimização de modo paralelo, mas geralmente produzir uma solução pior em comparação com o método de SA. Para acelerar o cálculo enquanto não deteriora a qualidade da solução, um algoritmo híbrido que combina um GA com SA é proposto em [16] para o problema de reconfiguração de redes para redução de perdas. A razão de mutação do GA é modificada pelo esquema SA para acentuar a qualidade da solução. Além disso, uma estrutura de vetor genético tanto quanto uma nova técnica de cruzamento e mutação a qual resulta em um eficiente processo de solução em sistema de distribuição radial também é proposto, resultando num método que pode rapidamente encontrar um ótimo global ou próximo dele para configuração da rede de sistemas de distribuição. Um outro GA também é proposto por [17] no qual a função aptidão não consiste apenas nas perdas ativas do sistema [16], mas também em valores de penalidade para a queda de tensão e violação da capacidade de corrente nas linhas do sistema de distribuição.

É interessante notar que as técnicas utilizando algoritmos do tipo "branch and bound" confundem-se com os algoritmos heurísticos para a resolução deste tipo de problema, pois ambos utilizam um esquema de busca semelhante procurando incorporar durante o processo de sondagem, regras de corte nos ramos da árvore de configurações. Essas regras procuram ser sempre muito bem definidas de modo a não conduzir a busca para rumos distantes do ótimo.

Neste trabalho o problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica é abordado objetivando o planejamento da operação de sistemas de distribuição com vistas a redução de perdas ativas e balanço de carga entre os alimentadores. A proposta de solução para o problema de reconfiguração é um algoritmo baseado em técnicas heurísticas que ao final do processo terá gerado um conjunto de configurações que poderão ser usadas como estratégias de operação. O principal objetivo deste trabalho é propor um algoritmo simples, robusto e eficiente para a solução do problema de reconfiguração. Basicamente a metodologia proposta consiste de um algoritmo de busca de configurações radiais, um método aproximado de cálculo de fluxo para encontrar o estado da rede, que envolve uma reordenação adequada das

linhas de modo a facilitar o processamento do cálculo de fluxo de carga e o critério do máximo limite de queda de tensão aliado à definição de um coeficiente de balanço de carga para reduzir o espaço de busca, evitando opções indesejadas de chaveamento. O coeficiente de balanço de carga da forma proposta e definida neste trabalho tem como finalidade auxiliar e justificar a utilização do critério da máxima queda de tensão para podar a árvore de configurações possíveis para o problema. Define-se também os conceitos de família e descendentes dentro do contexto da metodologia heurística de corte de configurações proposta, com vistas a justificar e provar a eficiência da mesma.

O trabalho tem a seguinte seqüência. No capítulo II é abordado o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição, as dificuldades na sua formulação matemática e restrições. Ainda no capítulo II são deduzidos alguns métodos de cálculo de fluxo de carga para redes radiais. No capítulo III é descrita a metodologia proposta e desenvolvida composta pelo algoritmo de busca das configurações radiais, o método aproximado de cálculo de fluxo de carga para redes radiais implementado e a técnica de corte das configurações pelo critério de queda de tensão. No capítulo IV são apresentados os resultados obtidos com os sistemas testados, inclusive um sistema real e no capítulo V são apresentadas as principais conclusões sobre o trabalho.



CAPÍTULO II

O Problema da Reconfiguração em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Neste capítulo apresenta-se, com base na bibliografia pesquisada, a formulação completa do problema de reconfiguração de redes de distribuição e suas características. Os principais métodos de cálculo de fluxo de carga desenvolvidos especialmente para sistemas radiais e para serem utilizados em estudo de reconfiguração, encontrados na literatura [2,6,12] são cuidadosamente analisados e discutidos.

2.1. Formulação do Problema

A maioria dos problemas práticos de otimização são obtidos a partir da modelagem matemática de situações físicas que ocorrem na vida real. Normalmente esses tipos de problemas não podem ser resolvidos por meio de técnicas convencionais de otimização em consequência das características de algumas restrições e da natureza das variáveis envolvidas na formulação matemática do problema. Entretanto, para os problemas mais importantes sempre são pesquisadas e implementadas técnicas

adequadas de resolvê-los. Mesmo assim, depois de contornadas as dificuldades de adequação da modelagem através de simplificações oportunas que vão implicar na qualidade da solução, muitas vezes não é possível encontrar a solução ótima de problemas mais complexos com esforços computacionais aceitáveis. Qualquer problema de otimização pode ser escrito como a busca da solução ótima de um determinado critério sujeito a um conjunto de restrições, ou seja:

$$\begin{array}{l} \text{s.a.} \left. \begin{array}{l} \text{Otimizar Objetivo} \\ \text{Conj. de Restrições} \end{array} \right\} \end{array} \quad (2.1)$$

Quando (2.1) for representado por um conjunto de equações descrevendo o comportamento de um sistema físico através de um modelo matemático, então se tem um problema de programação matemática. Se todas as relações do conjunto de restrições são lineares então se trata de um problema de Programação Linear (PL) e neste caso existem métodos eficientes de solução. Se as variáveis de decisão são inteiras, o problema pertence a uma classe especial do tipo Otimização Combinatorial. E ainda se uma parcela das variáveis de decisão deve assumir valores inteiros ou discretos e outra parte deve assumir valores reais o problema é do tipo Combinatorial Misto. Por outro lado se as relações do conjunto de restrições são não-lineares o problema está inserido na categoria dos problemas não-lineares inteiros mistos.

O problema da reconfiguração de redes de distribuição pode ser formulado como um Problema de Programação Não-Linear com variáveis inteiras e reais, cuja solução envolve a seleção dentre todas as configurações possíveis, daquela que tem a menor perda e que satisfaça a um conjunto de restrições tais como: radialidade do sistema onde estão envolvidas as variáveis inteiras devido às opções de chaveamento possível, níveis pré-especificados de tensão para todos os níveis de carga e confiabilidade. Esse problema pode ser formulado da seguinte maneira:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Minimizar} & P_k = \sum_{i=1}^{NR} R_i * I_i^2 \\
 \text{s.a.} & \left. \begin{array}{l}
 - \text{radialidade;} \\
 - \text{restrições de níveis de tensão;} \\
 - \text{restrições de confiabilidade;} \\
 - \text{restrições de balanço de carga entre os alimentadores;} \\
 - i \in I; I \text{ é o conjunto de todos os ramos do sistema.}
 \end{array} \right\} (2.2)
 \end{array}$$

Em que:

- $k \in K$; K conjunto de todas as configurações radiais factíveis para o sistema.
- P_k : perdas ativas em todos os ramos da configuração k .
- NR : número de ramos da configuração k .
- R_i : resistência do i -ésimo ramo da configuração k .
- I_i : corrente no i -ésimo ramo da configuração k .

Este tipo de problema é de difícil tratamento por causa da sua natureza combinatorial, além da dificuldade na formulação matemática das restrições, como por exemplo a radialidade. Em consequência dessas dificuldades tanto para resolução de problemas gerais com essas características tanto para o problema da reconfiguração surgiram os algoritmos heurísticos.

Algoritmos heurísticos consistem em um conjunto de procedimentos simples, muitas vezes baseados em procedimentos práticos retirados da experiência dos operadores, que encontram soluções de boa qualidade para problemas complexos com esforço computacional relativamente pequeno. Entretanto, não garantem encontrar a solução ótima. Geralmente são usados quando não existe método exato de resolução, existe a dificuldade na formulação matemática ou a metodologia existente necessita de elevado esforço computacional para resolver um problema dessa natureza, isto é, os métodos exatos disponíveis são ineficientes ou pouco atraentes sob o aspecto de tempo computacional para obter a solução do problema que está sendo pesquisado. Também

são usados quando a solução ótima não é muito importante porque existem muitos ótimos locais de qualidade parecida e esses ótimos locais são importantes porque são necessárias várias opções de solução como é o caso do problema de reconfiguração para restauração do sistema em caso de uma falta e planejamento da operação. E ainda quando os dados são pouco confiáveis (todos os problemas de planejamento); quando existe limitação de tempo e espaço (problemas em tempo real – operação); e quando o objetivo é encontrar uma boa solução para auxiliar outro algoritmo heurístico mais sofisticado ou um método exato.

2.2. Cálculo de Fluxo de Carga em Redes Radiais de Distribuição de Energia Elétrica

Os métodos de cálculo de fluxo de carga em redes radiais de distribuição que serão apresentados são aproximados para que se tornem mais rápidos quando usados para estimar o estado do sistema e conseqüentemente a variação de perdas após um chaveamento na solução do problema de reconfiguração. Um cuidado que sempre deve ser tomado na implementação de um método de cálculo de fluxo de carga é no que diz respeito à sua precisão, que deve ser aceitável em comparação a um método que apresenta bons índices de confiabilidade e precisão, por exemplo o método de Newton-Raphson acoplado. Esse método tem apenas os agravantes de tempo de processamento e o problema que sua convergência depende do ponto de inicialização. No problema de reconfiguração para a redução de perdas em um sistema, a diferença de precisão entre um método aproximado e um método em que se considera a modelagem completa dos componentes da rede pode conduzir a busca para um rumo diferente ao do ponto de otimalidade.

2.2.1. *Forward Update DistFlow*

O método de cálculo de fluxo de potência para redes radiais de distribuição desenvolvido por Baran e Wu [2] pode ser descrito por um conjunto de equações de fluxo de potência que foi desenvolvido especialmente para alimentadores



radiais de distribuição e usados no problema de alocação de capacitores pelo mesmo autor em [13]. O método pode ser usado para sistemas que não são bem compensados por que os fluxos de potência reativa são explicitamente incluídos nas equações. O método é dado por um conjunto de equações chamado "*DistFlow Branch Equations*". Para ilustrar o método proposto e desenvolvido por Baran e Wu [2], considere a figura a seguir:

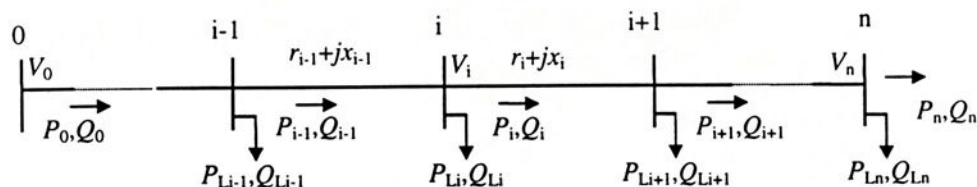


Figura 2.1 – Diagrama unifilar de um alimentador radial

De acordo com a figura 2.1, se P_0, Q_0, V_0 são valores conhecidos ou estimados para o primeiro nó da rede, e então os valores de P, Q, V podem ser calculados para os outros nós da rede a partir do conjunto de equações que será deduzido a seguir.

Este conjunto de equações usa as potências ativa, reativa e magnitude de tensões em um nó emissor de um ramo - P_i, Q_i, V_i - respectivamente, para expressar a mesma quantidade em um terminal receptor de outro ramo.

As seguintes convenções são adotadas de acordo com a figura 2.1:

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_i &= \dot{V}_i \dot{I}_i^* & \dot{V}_i &= V_i \angle 0^\circ & P_i + jQ_i &= \dot{V}_i \dot{I}_i^* \\ \dot{I}_i^* &= \frac{P_i + jQ_i}{V_i} & \dot{I}_i &= \frac{P_i - jQ_i}{V_i} & |I_i| &= \frac{\sqrt{P_i^2 + Q_i^2}}{V_i} \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

Substituindo-se as convenções feitas acima na primeira parte da equação abaixo tem-se na segunda parte da equação as potências ativas e reativas do nó receptor:

$$\left. \begin{aligned} P_{i+1} &= P_i - P_{Li+1} - \text{Perdas} \Rightarrow P_{i+1} = P_i - r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - P_{Li+1} \\ Q_{i+1} &= Q_i - Q_{Li+1} - \text{Perdas} \Rightarrow Q_{i+1} = Q_i - x_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - Q_{Li+1} \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Para a tensão utiliza-se a seguinte convenção:

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_i &= V_i \angle 0^\circ & \dot{V}_{i+1} &= V_{i+1} \angle \delta & \dot{I}_i &= \frac{V_i \angle 0 - V_{i+1} \angle \delta}{r_i + jx_i} \\ \dot{S}_i &= \dot{V}_i \dot{I}_i^* & \dot{S}_i^* &= \dot{V}_i^* \dot{I}_i & S_i &= P_i + jQ_i \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Pode-se escrever que:

$$\left. \begin{aligned} P_i - jQ_i &= V_i \left(\frac{V_i \angle 0 - V_{i+1} \angle \delta}{r_i + jx_i} \right) \\ P_i - jQ_i &= V_i \left(\frac{V_i - V_{i+1} \cos \delta - jV_{i+1} \sin \delta}{r_i + jx_i} \right) \left(\frac{r_i - jx_i}{r_i - jx_i} \right) \\ P_i - jQ_i &= \frac{V_i}{r_i^2 + x_i^2} \left\{ \begin{aligned} &[r_i(V_i - V_{i+1} \cos \delta) - x_i V_{i+1} \sin \delta] \\ &- j[V_i x_i - V_{i+1} x_i \cos \delta + V_{i+1} r_i \sin \delta] \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

Separando a parte real da imaginária da equação (2.6) e elevando-as ao quadrado tem-se:

$$\left. \begin{aligned} P_i^2 &= \frac{V_i^2}{(r_i^2 + x_i^2)^2} \left[r_i^2 V_i^2 - 2r_i^2 V_i V_{i+1} \cos \delta - 2r_i x_i V_i V_{i+1} \sin \delta + r_i^2 V_{i+1}^2 \cos^2 \delta \right. \\ &\quad \left. + 2r_i x_i V_{i+1}^2 \sin \delta \cos \delta + x_i^2 V_{i+1}^2 \sin^2 \delta \right] \\ Q_i^2 &= \frac{V_i^2}{(r_i^2 + x_i^2)^2} \left[x_i^2 V_i^2 - 2x_i^2 V_i V_{i+1} \cos \delta + 2r_i x_i V_i V_{i+1} \sin \delta + r_i^2 V_{i+1}^2 \sin^2 \delta \right. \\ &\quad \left. - 2r_i x_i V_{i+1}^2 \sin \delta \cos \delta + x_i^2 V_{i+1}^2 \cos^2 \delta \right] \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

Somando as equações de P_i^2 e Q_i^2 tem-se:

$$\frac{(P_i^2 + Q_i^2)(r_i^2 + x_i^2)}{V_i^2} = [V_i^2 - 2V_i V_{i+1} \cos \delta + V_{i+1}^2] \quad (2.8)$$

Multiplicando-se as equações de P_i e Q_i por r_i e x_i respectivamente, somando-se as duas equações resultantes e multiplicando a soma por (-2) tem-se:

$$-2 * (r_i P_i + x_i Q_i) = -2V_i^2 + 2V_i V_{i+1} \cos \delta \quad (2.9)$$

Somando-se (2.8) com (2.9) tem-se:

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) + \frac{(r_i^2 + x_i^2)}{V_i^2} * (P_i^2 + Q_i^2) \quad (2.10)$$

De (2.4) e (2.10) chega-se ao conjunto de equações do "Forward Update DistFlow":

$$\left. \begin{aligned} P_{i+1} &= P_i - r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - P_{Li+1} \\ Q_{i+1} &= Q_i - x_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - Q_{Li+1} \\ V_{i+1}^2 &= V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) + (r_i^2 + x_i^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

Para o problema de redução de perdas, o objetivo é minimizar o total de perdas $r i^2$ do sistema, o qual pode ser calculado como:

$$LP = \sum_{i=0}^{n-1} r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad p.u. \quad (2.12)$$

Para estimar a redução de perdas no sistema por causa da troca de ramos na referência [2] são propostas algumas simplificações no conjunto de equações (2.11), ressalta-se que os termos quadráticos em (2.11) que representam as perdas nos ramos e eles são muito menores de que os termos de potência – P_i e Q_i – nos ramos, permitindo-se suprimir os termos quadráticos, e obtendo-se um novo conjunto de equações da seguinte forma:

$$\left. \begin{aligned} P_{i+1} &= P_i - P_{Li+1} \\ Q_{i+1} &= Q_i - Q_{Li+1} \\ V_{i+1}^2 &= V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

Esse novo conjunto de equações pode ser chamado de "*Simplified DistFlow Equations*" e a perda aproximada nos ramos pode ser calculada como:

$$LP = \sum_{i=0}^{n-1} r_i (P_i^2 + Q_i^2) \quad p.u. \quad (2.14)$$

2.2.2. Backward Update DistFlow

O "*backward update*" também proposto por Baran e Wu em [2], de modo similar ao "*forward update*", parte do último nó da rede, ou seja, o nó mais afastado da subestação assumindo que se P_n, Q_n, V_n são conhecidos para esse nó, e então os valores de P, Q, V podem ser calculados para os outros nós da rede a partir do conjunto de equações 2.15 abaixo. Aqui também, as variáveis estão definidas de acordo com a figura 2.1. Este conjunto de equações usa as potências ativa, reativa e magnitude de tensões em um nó receptor de um ramo - P_i, Q_i, V_i - respectivamente, para expressar a mesma quantidade em um terminal emissor de outro ramo.

Da mesma maneira que foram deduzidas as equações do *forward update*, pode-se chegar também às equações do *backward update*, que são as seguintes:

$$\left. \begin{aligned} P_{i-1} &= P_i + r_{i-1} \frac{P_i'^2 + Q_i'^2}{V_i^2} + P_{Li} \\ Q_{i-1} &= Q_i + x_{i-1} \frac{P_i'^2 + Q_i'^2}{V_i^2} + Q_{Li} \\ V_{i-1}^2 &= V_i^2 + 2(r_{i-1}P_i' + x_{i-1}Q_i'') + (r_{i-1}^2 + x_{i-1}^2) \frac{P_i'^2 + Q_i'^2}{V_i^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

em que, $P_i' = P_i + P_{Li}$ e $Q_i' = Q_i + Q_{Li}$.

De acordo com a metodologia proposta Baran e Wu em [2] pode-se obter uma metodologia rápida para estimar a magnitude das tensões no sistema, as injeções de potência ativa e reativa em todos os nós da rede bem como o valor aproximado das perdas no sistema.

2.2.3. Processo Iterativo Aproximado 1 [6]

O método de cálculo de fluxo de potência de rede de distribuição utilizado por Shirmohammadi e Hong na referência [6] com o propósito de tornar mais eficiente o algoritmo heurístico para reconfiguração de redes de distribuição usa um processo iterativo simples e de fácil implementação. Em sua metodologia Shirmohammadi e Hong [6] propõe a ordenação dos ramos do sistema de distribuição a partir do nó raiz em camadas e enumeração de todos os ramos do sistema também começando pela nó raiz de acordo com a figura 2.2. Os ramos de uma camada somente serão enumerados depois que todos os ramos da camada anterior forem enumerados.

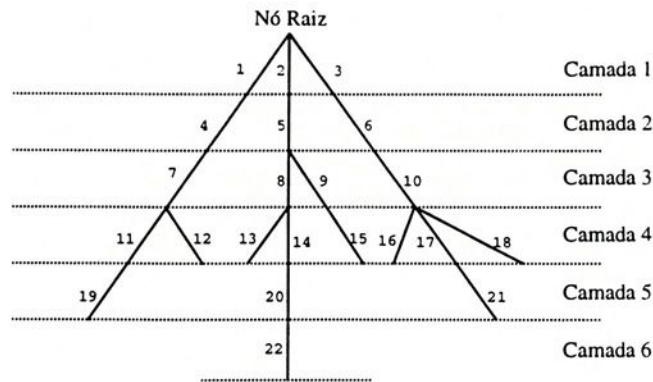


Figura 2.2 – Numeração dos ramos de um sistema de distribuição radial

O processo iterativo para o cálculo do fluxo aproximado pode ser descrito como segue. Para iniciar o processo faz-se a atribuição da tensão do nó raiz (V_r) a todos os nós do sistema (V_p):

$$V_p^{(0)} = V_r \quad p = 1, 2, \dots, n \quad (2.15)$$

em que n é o número de nós do sistema.

Depois disso é calculada a injeção de corrente para cada nó da rede:

$$I_p^{(k)} = \left(\frac{S_p}{V_p^{(k-1)}} \right)^* - Y_p V_p^{(k-1)} \quad (2.16)$$

em que k é o número da iteração e S_p , V_p e Y_p é a injeção de potência, tensão e admitância shunt total para o nó p , respectivamente. O "*" é o operador complexo conjugado.

Partindo dos ramos da última camada em direção ao nó raiz as correntes são calculadas em cada ramo fazendo-se a soma da corrente do próprio nó com a corrente de todos os ramos que derivam desse mesmo nó.

$$J_b^{(k)} = -I_q^{(k)} + \sum \left(\begin{array}{l} \text{correntes nos ramos} \\ \text{que derivam do nó } q \end{array} \right) \quad b = m, m-1, \dots, 1 \quad (2.17)$$

em que q é o nó receptor do ramo b e m é o número de ramos do sistema.

Partindo-se do nó raiz para as últimas camadas calcula-se a nova tensão para cada nó da seguinte maneira:

$$V_q^{(k)} = V_p^{(k)} - Z_b J_b^{(k)} \quad b = 1, 2, \dots, m \quad (2.18)$$

em que Z_b é a impedância do ramo b e $p-q$ são os nós emissor e receptor do ramo b .

O teste de convergência é feito pela comparação entre a potência nominal do nó e a potência calculada por meio de V e I determinados pelo processo.

$$\Delta S = S_p - V_p^{(k)} I_p^{(k)*} \quad p = 1, 2, \dots, n \quad (2.19)$$

O processo volta para o cálculo de injeção de correntes nos nós e é repetido até que ΔS esteja dentro de uma tolerância especificada.

2.2.4. Processo Iterativo Aproximado 2 [12]

Outro método de cálculo de fluxo de potência de rede de distribuição é proposto por Cespedes na referência [12]. Nesse método o autor também usa um processo iterativo simples e de fácil implementação. Para ilustrar considere a figura a seguir:

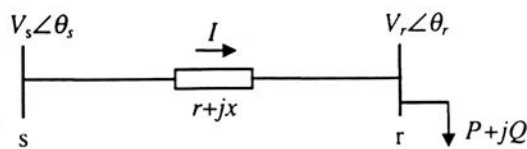


Figura 2.3 – Diagrama unifilar de parte de um alimentador radial

Em que:

- s : nó do lado da fonte (source);
- r : nó do lado carga ou nó receptor (receiving);
- V_s : magnitude de tensão do lado da fonte;
- V_r : magnitude de tensão do lado da carga;
- P, Q : potência ativa e reativa da carga;
- r, x : resistência e reatância do ramo.

De acordo com a figura 2.3, as seguintes convenções são adotadas:

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}^* &= \dot{V}^* \dot{I} & P - jQ &= \dot{V}_r \dot{I} = \dot{V}_r \frac{(\dot{V}_s - \dot{V}_r)}{r + jx} & \dot{I} &= \frac{\dot{V}_s - \dot{V}_r}{r + jx} \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

Da equação (2.20) obtêm-se:

$$\dot{V}_s - \dot{V}_r = \dot{I} (r + jx) \quad (2.21)$$

Da mesma maneira tem-se que:

$$\left. \begin{aligned} \dot{S} &= \dot{V} \dot{I}^* & P + jQ &= (V_r \angle \theta_r) I^* & I^* &= \frac{P + jQ}{V_r \angle \theta_r} \end{aligned} \right\} \quad (2.22)$$

E da equação (2.22) obtém-se:

$$\dot{I} = \frac{P - jQ}{V_r \angle -\theta_r} \quad (2.23)$$

Substituindo a equação (2.23) em (2.21) tem-se:

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{V}_s - \dot{V}_r &= \frac{P - jQ}{V_r \angle -\theta_r} (r + jx) \\
 (V_s \angle \theta_s - V_r \angle \theta_r) \quad V_r \angle -\theta_r &= (P - jQ) (r + jx) \\
 V_r V_s \angle \theta_s - \theta_r - V_r^2 &= rP + xQ - jRQ + jxP \\
 V_r V_s \cos(\theta_s - \theta_r) - V_r^2 + jV_r V_s \sin(\theta_s - \theta_r) &= (rP + xQ) + j(xP - rQ)
 \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

Separando a parte real da imaginária as seguintes equações são obtidas:

$$V_r V_s \cos(\theta_s - \theta_r) = V_r^2 + rP + xQ \quad (2.25)$$

$$V_r V_s \sin(\theta_s - \theta_r) = xP + rQ \quad (2.26)$$

Elevando as eq. (2.25) e (2.26) ao quadrado tem-se:

$$(V_r V_s)^2 \cos^2(\theta_s - \theta_r) = V_r^4 + 2V_r^2 (rP + xQ) + (rP + xQ)^2 \quad (2.27)$$

$$(V_r V_s)^2 \sin^2(\theta_s - \theta_r) = (xP - rQ)^2 \quad (2.28)$$

Somando as eq. (2.27) e (2.28) tem-se:

$$\left. \begin{aligned}
 V_r^2 V_s^2 &= V_r^4 + V_r^2 (2rP + 2xQ) + r^2 P^2 + x^2 Q^2 + x^2 P^2 + r^2 Q^2 \\
 f V_r^4 + V_r^2 [2(rP + xQ)] - V_r^2 V_s^2 + P^2 (r^2 + x^2) + Q^2 (r^2 + x^2) &= 0 \\
 V_r^4 + V_r^2 [2(rP + xQ) - V_s^2] + (P^2 + Q^2)(r^2 + x^2) &= 0
 \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

Da equação (2.29) obtêm-se a equação que relaciona as tensões entre os nós r e s :

$$V_r^4 + [2(rP + xQ) - V_s^2] V_r^2 + (P^2 + Q^2)(r^2 + x^2) = 0 \quad (2.30)$$

Para o cálculo das perdas tem-se:

$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{P - jQ}{V_r \angle -\theta_r} & |I| &= \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{V_r} \end{aligned} \right\} \quad (2.31)$$

$$\left. \begin{aligned} P_e &= r I^2 & P_e &= r \frac{P^2 + Q^2}{V_r^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.32)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_e &= x I^2 & Q_e &= x \frac{P^2 + Q^2}{V_r^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.33)$$

Apesar de ser um processo iterativo simples, a proposta da metodologia para resolver o fluxo carga deve ter uma orientação dos ramos no sentido do nó raiz, de modo que, a árvore formada por todos os ramos deve ser seguida de forma sistemática, partindo do último nó e terminando no nó raiz. A figura 2.4 ilustra a numeração dos ramos e suas orientações.

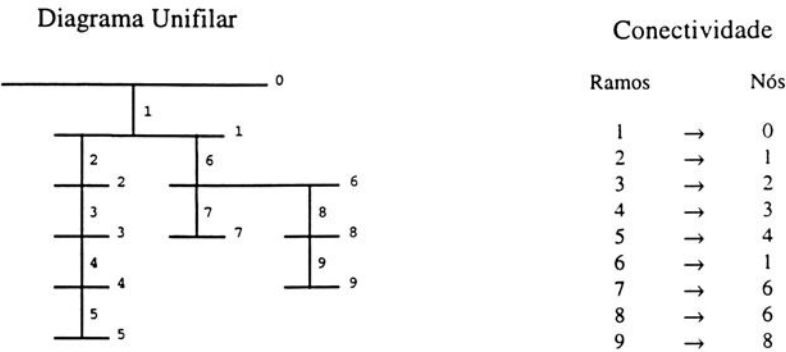


Figura 2.4 – Diagrama unifilar de um sistema radial com numeração dos ramos e nós indicando a orientação dos ramos

O processo para o cálculo do fluxo aproximado pode ser descrito da seguinte maneira:

Passo 1: Atribua um valor de tensão para cada nó da rede.

Passo 2: Calcule a carga equivalente para cada nó do sistema somando todas as cargas da rede que são alimentadas através do nó, incluindo as perdas, que são calculadas pelas equações (2.32) e (2.33). Esta é a chamada iteração "upstream", que parte do último nó em direção ao nó raiz.

Passo 3: Partindo do nó raiz e usando a equação (2.30) calcular a tensão para todas as cargas. Esta é a chamada iteração "downstream", que parte do nó raiz em direção aos últimos nós.

Passo 4: Com as novas tensões recalcular as perdas na iteração "upstream" e comparar com as perdas da iteração anterior. Se o valor da diferença entre elas for maior do que um erro especificado, voltar ao *passo 2*.

O processo iterativo converge quando o valor da diferença entre as perdas calculadas em duas iterações subseqüentes for menor de que um erro especificado.



CAPÍTULO III

Metodologia Desenvolvida

O conteúdo apresentado neste capítulo refere-se à metodologia proposta e desenvolvida para abordar o problema da reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica que consiste dos seguintes passos:

- busca de configurações radiais;
- cálculo de queda de tensão;
- técnica de corte de configurações;
- critério de avaliação da qualidade da configuração radial obtida.

3.1. Introdução

O método proposto e desenvolvido utiliza a técnica de "branch exchange", isto é, utiliza a troca de ramos para encontrar novas configurações a partir de uma configuração radial inicial em um processo de expansão tipo árvore, assemelhando-se à metodologia do tipo "branch and bound".

O objetivo da metodologia é encontrar a partir de uma configuração radial inicial, um conjunto de melhores configurações factíveis para um sistema com a finalidade de utilizá-las como estratégias de operação. Um algoritmo para encontrar a solução ótima deveria realizar uma busca entre as configurações radiais possíveis, e assim ficaria fácil encontrar entre todas as possibilidades um conjunto das melhores ou apenas a melhor de todas. Entende-se por melhor configuração aquela que apresenta o menor valor de perdas e satisfaça as restrições de operação. Mas quando se trata de sistemas de tamanho prático, o número de possibilidades de chaveamento é muito grande gerando assim um número de configurações também muito grande que é proporcional ao número de chaves do sistema. Notando a dimensão do problema com relação a esses aspectos foi desenvolvido um método para "podar" a árvore de configurações a serem analisadas. A estratégia de poda procura sempre manter ativas as configurações mais promissoras, para que finalmente se possa encontrar um conjunto reduzido de configurações com as melhores configurações.

A técnica de corte (método de poda) das configurações é baseada no máximo limite de queda de tensão permitido. Esse limite de queda de tensão deve ser predeterminado corretamente para cada sistema por meio de testes adequados. O trabalho também tem o intuito de explorar o balanço de carga entre os alimentadores e trabalhar com a densidade de carga por regiões do sistema. Para enfocar esse aspecto foi desenvolvido e implementado um coeficiente de balanço de carga que é uma relação proporcional entre a potência e distância elétrica (resistência dos ramos) de cada barra do sistema. O coeficiente de balanço de carga procura demonstrar a eficiência da técnica de corte de configurações por meio de várias análises nos seus resultados.

Pelo fato de que a técnica de corte está baseada no máximo limite de queda de tensão será necessária a obtenção do estado do sistema muitas vezes durante o processo de reconfiguração, ou seja, o cálculo de fluxo de carga deverá ser processado inúmeras vezes. Desse modo, algumas características para o método de cálculo de fluxo de carga são desejáveis, tais como rapidez e precisão adequada ao problema em questão. Levando esses fatos em consideração foi implementado um processo iterativo simples,

rápido e eficiente para o cálculo de fluxo de carga, utilizando-se uma modelagem simplificada da rede, sem considerar os reguladores de tensão.

3.2. Método de Troca de Ramos ("Branch-Exchange") para a Obtenção de Novas Configurações

Para demonstrar o funcionamento da técnica de "branch-exchange", ou seja, a troca de ramos para a obtenção de novas configurações, algumas convenções devem ser feitas com vistas a não perder a generalidade, com especial atenção às situações práticas. Deve-se considerar que a ligação entre duas barras é um ramo. Em cada ramo existe uma chave seccionadora e que as cargas estão concentradas nas extremidades dos ramos, ou seja, nas barras. As considerações no que diz respeito às chaves nos ramos estão ilustradas no sistema de distribuição de três alimentadores [1] mostrado na figura 3.1, na qual os ramos sólidos representam as chaves fechadas e os pontilhados representam as chaves abertas. As chaves abertas são as chaves de interconexão entre os alimentadores.

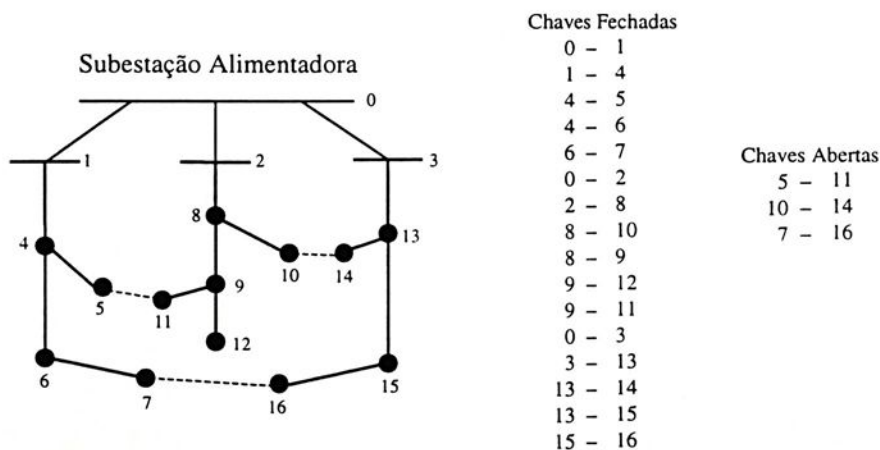


Figura 3.1. Sistema de Distribuição de Três Alimentadores

O processo para a obtenção das novas configurações por meio da troca de ramos tem esta denominação justamente porque é realizada a troca de um ramo fechado por um aberto para gerar uma nova configuração, isto é, um ramo que estava aberto passa a estar fechado e um ramo que estava fechado passa a estar aberto.

Como exemplo, considere o sistema radial da figura 3.1, no qual a chave (ramo) 5–11 é fechada, tornando o sistema uma estrutura fracamente malhada. Na figura 3.2 pode ser observado o laço formado por essa manobra.

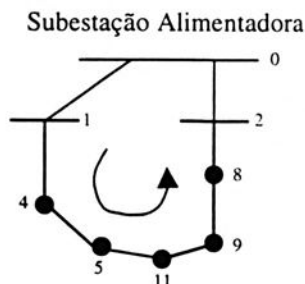


Figura 3.2. Laço formado pelo fechamento de uma chave de interconexão

De acordo com a figura 3.2 o laço, com exceção do ramo 5-11 que estava aberto, é formado pela sequência de ramos 1–4, 4–5, "5–11", 11–9, 9–8, 8–2. Como a barra 0 apenas simboliza a barra comum, que pode ser uma mesma subestação ou subestações diferentes, os ramos 0–1 e 0–2 não fazem parte da sequência de ramos do laço. Para restabelecer a radialidade do sistema e encontrar as novas configurações, as chaves do laço que foi formado com o fechamento da chave 5-11 devem ser abertas uma a uma. Cada um dos ramos da sequência que forma o laço será trocado pelo ramo 5-11, isto é, cada ramo do laço vai para a lista de chaves abertas e o ramo 5-11 vai para a lista de chaves fechadas. As configurações geradas pela troca de ramos nesse laço podem ser observadas na figura 3.4.

3.3. Algoritmo de Busca de Configurações Radiais

De forma genérica, no processo para a obtenção de todas as configurações possíveis para qualquer sistema deve-se fazer combinações com as chaves abertas da configuração inicial para fechá-las. A combinação das chaves abertas deve iniciar por uma a uma, depois duas a duas, até na a na , em que na é o número total de chaves abertas do sistema. Combinar as chaves abertas da configuração inicial uma a uma significa fechar cada uma delas por vez. Pela técnica de troca de ramos, para gerar novas configurações cada chave aberta que for fechada forma um laço e abrindo cada

uma das chaves do laço obtêm-se as novas configurações. Quando a combinação das chaves abertas for feita duas a duas, fecham-se duas chaves abertas, formam-se dois laços e deve-se abrir uma chave de cada laço para gerar as novas configurações. Dessa forma, o processo de busca deve ser feito até que as chaves sejam combinadas *na a na*, de modo que sejam feitas todas as combinações possíveis.

Baseado no processo combinatorial descrito acima. O algoritmo de busca de configurações radiais implementado identifica a partir de um conjunto de chaves fechadas e outro de chaves abertas (figura 3.1) a configuração inicial do sistema. A partir da configuração inicial, as novas configurações são encontradas utilizando a troca de ramos formando uma árvore de expansão do tipo "branch-and-bound". Para maior facilidade no entendimento do esquema de busca, a árvore de configurações foi dividida em níveis de acordo com a figura 3.3.

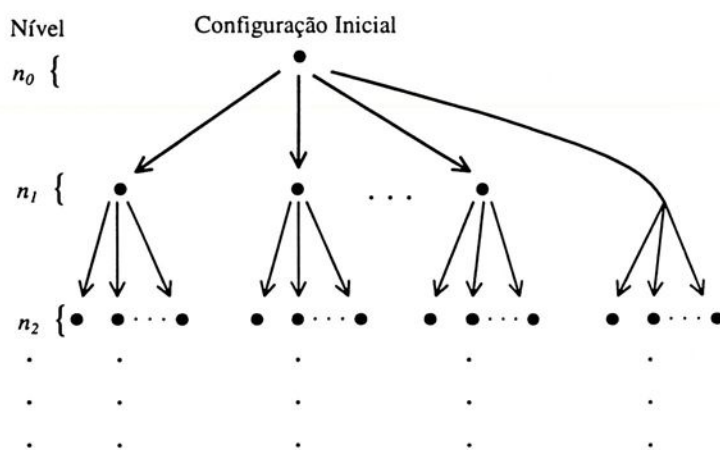


Figura 3.3 - Níveis da árvore de configurações

A configuração inicial está no *nível* n_0 da árvore de configurações. O conjunto de configurações geradas com o fechamento de cada uma das chaves abertas formará um outro nível. Desse modo, ao ser fechada a primeira chave aberta formar-se-á o *nível* n_1 da árvore, que é composto pelo conjunto de configurações que são geradas a partir das configurações dos níveis anteriores, neste caso, apenas o *nível* n_0 . Quando for fechada a segunda chave aberta para gerar as configurações do *nível* n_2 serão tomadas todas as configurações dos níveis anteriores para serem chaveadas, isto é, as configurações dos *níveis* n_0 e n_1 . Do mesmo modo, para gerar as configurações do *nível* n_3 devem ser tomadas para efetuar o chaveamento, as configurações dos *níveis* n_0 , n_1 e

n_2 . E assim é feito até que todas as chaves abertas da configuração inicial sejam fechadas. Na árvore de configurações o número de níveis será sempre igual ao número de chaves de interconexão do sistema mais um.

A título de ilustração, considere o sistema da figura 3.1 como sendo a configuração inicial de um sistema a ser reconfigurado. A configuração da figura 3.1 estará no nível n_0 , por ser a configuração inicial. Tomando a chave 5–11 como a primeira chave aberta a ser fechada, as seguintes configurações farão parte do nível n_1 :

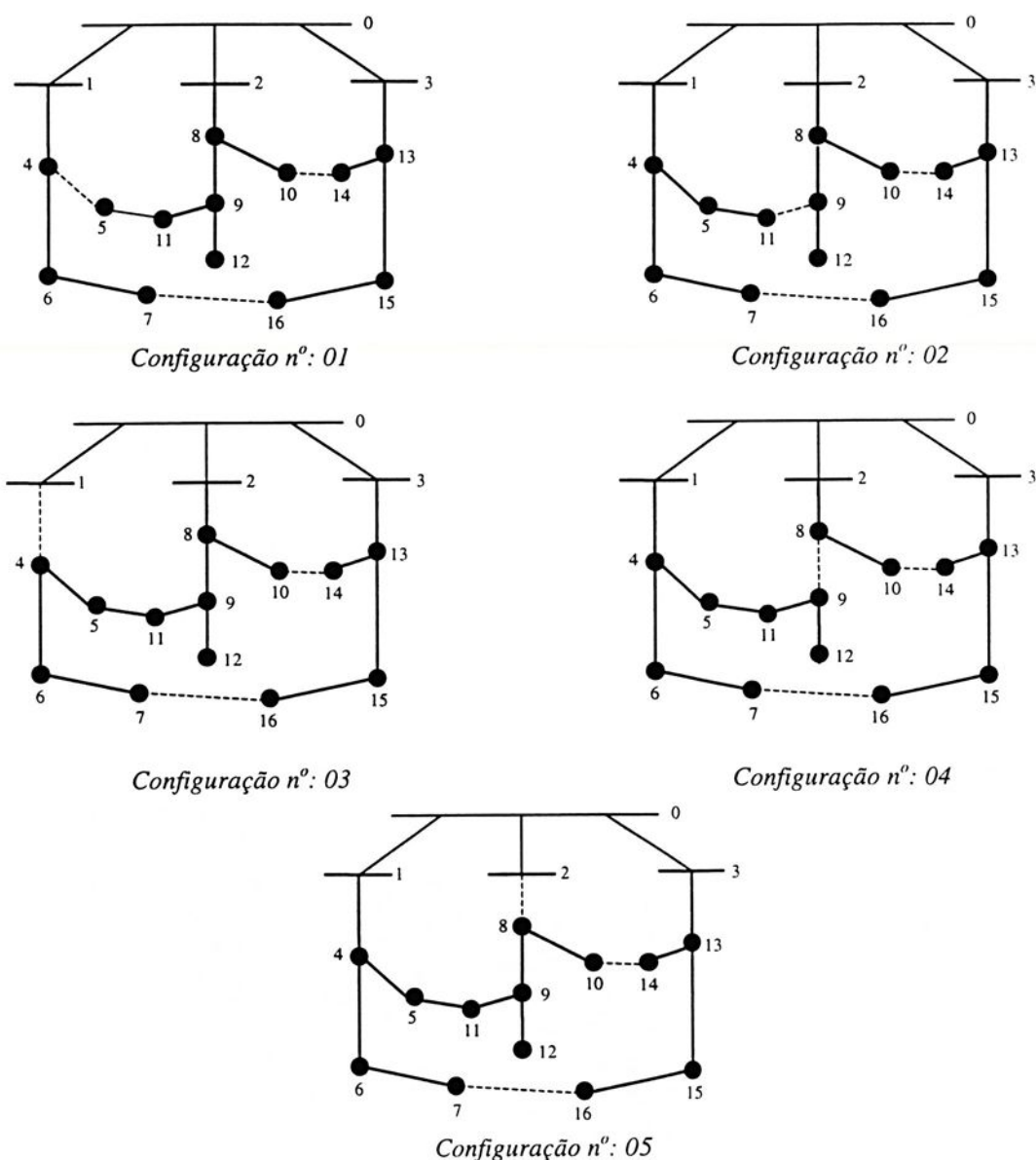


Figura 3.4 – Configurações do nível n_1

Quando for fechada a segunda chave aberta 10–14 serão tomadas as configurações dos níveis anteriores para serem chaveadas, isto é, a configuração inicial do nível n_0 e as configurações da figura 3.4 que fazem parte do nível n_1 . O chaveamento dessas configurações vai gerar as configurações radiais do nível n_2 . E na sequência, ao ser fechada a terceira e última chave 7–16 devem ser tomadas para efetuar o chaveamento, as configurações dos níveis n_0 , n_1 e n_2 para gerar as configurações do nível n_3 . O sistema utilizado como exemplo tem apenas três chaves de interconexão e por isso a árvore de configurações tem quatro níveis.

Esse processo de combinações garante que sejam geradas todas as possibilidades de configurações e que todas são radiais, mas não garante a singularidade delas, podendo ser geradas muitas configurações repetidas. Além da garantia de que todas as configurações são radiais, o método de troca de ramos assegura que nenhuma carga ficará ilhada, tendo apenas como restrição a capacidade de armazenamento de dados e o tempo de processamento dos equipamentos que são utilizados atualmente na maioria das pesquisas, ou seja, a capacidade dos microcomputadores, em consequência do fenômeno da explosão combinatorial.

3.4. Técnica de corte das configurações

A técnica de corte de configurações procura estabelecer um critério que reduza o conjunto de configurações a serem examinadas (espaço de busca). Esta estratégia de redução do espaço de busca ou poda na árvore de configurações procura sempre manter ativas durante o processo de busca somente as configurações mais atrativas, de modo que ao final do processo seja obtido um conjunto de configurações com os menores valores de perdas possíveis, satisfazendo às restrições de operação.

O critério de corte das configurações adotado neste trabalho é baseado no máximo limite de queda de tensão permitido no sistema e/ou no coeficiente de balanço de carga, já que ambos os critérios estão inter-relacionados. Em termos práticos isto quer dizer que uma configuração será excluída quando a tensão em algum alimentador



do sistema tiver uma queda de tensão maior de que o limite preestabelecido. Esse limite de queda de tensão preestabelecido não é aquele normalmente utilizado como restrição na operação, mas sim um que mantenha o espaço de busca de tamanho gerenciável. O limite de queda de tensão para cada sistema pode ser diferente em consequência de características próprias dos mesmos, como por exemplo dimensão, topologia e também a densidade de cargas.

Para que a técnica de corte seja executada, a cada nova configuração encontrada, é necessário a obtenção do estado do sistema, ou seja, as tensões em cada barra, para que possa ser feita a verificação do limite de queda de tensão e então cortar ou não a configuração. Cortar uma configuração significa que ela será descartada do espaço de busca e não vai gerar nenhuma outra configuração nos níveis subsequentes da árvore de configurações, de acordo com o método de busca implementado, ou seja, se a máxima queda de tensão permitida é de $X\%$ em relação à tensão da subestação, todas as configurações que tiverem queda de tensão superior a esse valor de $X\%$ serão descartadas. Para ilustrar considere a figura 3.5.

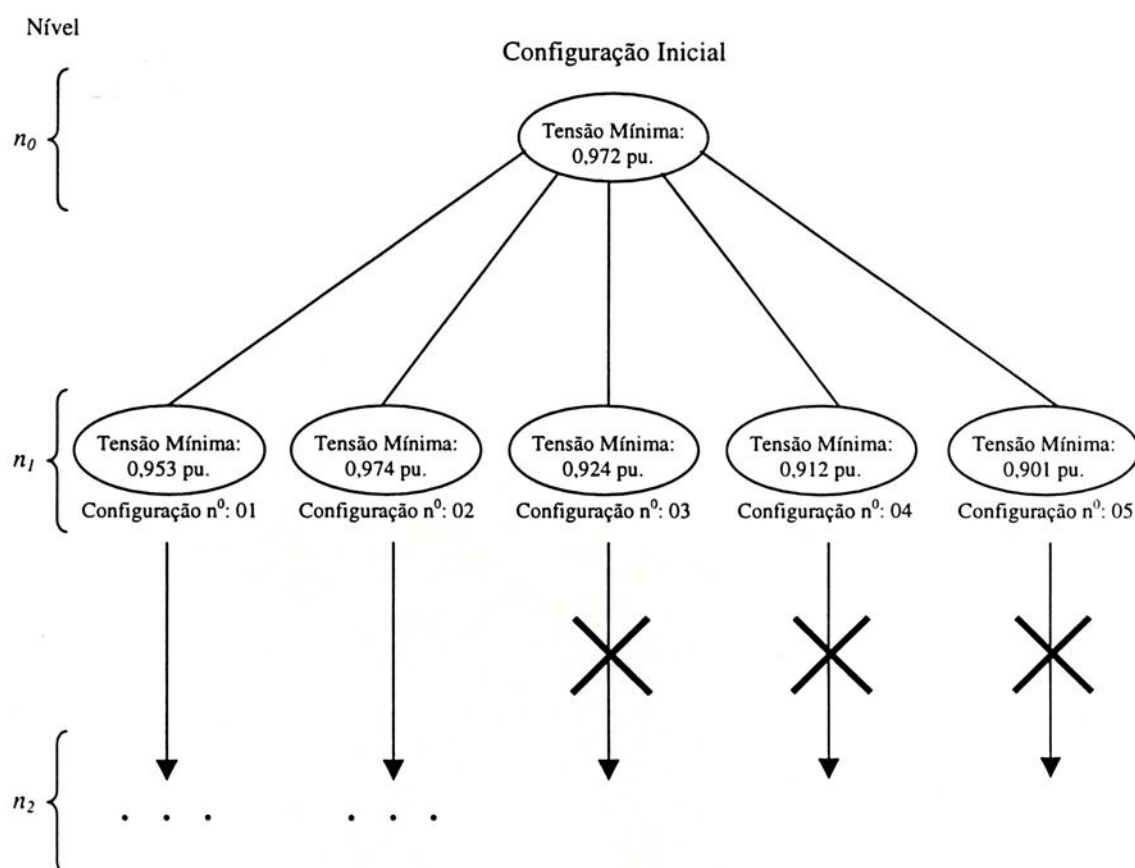


Figura 3.5 – Ilustração da técnica de corte de configurações

De acordo com a figura 3.5, em que se tem a configuração inicial do sistema no *nível* n_0 e as configurações descendentes no *nível* n_1 , como exemplo, predetermina-se que a máxima queda de tensão permitida seja 0,05 pu ou 5% em relação à tensão da subestação considerada 1,0 pu. Isto significa que a tensão mínima permitida no sistema será 0,95 pu, ou seja, as configurações que tiverem a tensão abaixo de 0,95 pu serão descartadas. Pela figura 3.5 pode ser notado que se adotado o limite de 0,05 pu como máxima queda de tensão permitida, as configurações de números 1 e 2 gerarão outras configurações nos próximos níveis enquanto que as configurações 3, 4 e 5, da mesma figura, serão descartadas e não terão descendentes nos próximos níveis. É interessante ressaltar também que mesmo que a configuração inicial tenha tensão mínima abaixo do limite preestabelecido, ela sempre vai ser usada para os chaveamentos que gerarão os níveis subsequentes. Isso deve ocorrer para que o processo de busca faça todas as combinações necessárias com as chaves abertas para encontrar as novas configurações.

Devido à estrutura e à forma como método de busca de configurações foi implementado, no qual são realizadas as combinações com as chaves abertas da configuração inicial, poderão ser geradas configurações repetidas, ou seja, poderão ser geradas famílias repetidas ou sub-espacos de busca que já foram explorados. Isto significa que podem ser sondadas ou exploradas descendentes de uma configuração que poderiam ter sido descartados pela exclusão dessa configuração do espaço de busca. A limitação com relação ao tamanho do sistema para ampliar o espaço de busca, ou seja, relaxar o limite de queda de tensão permitido está no fato de que quanto maior for o sistema, maior o número de opções de chaveamento para esse desse sistema de modo que para a garantia da obtenção da solução ótima ou próxima da ótima há a necessidade de uma busca a um maior número de configurações, ou seja, há a necessidade de cobrir uma parte maior do espaço de busca.

Nas etapas do desenvolvimento desta pesquisa, o critério de corte de configurações foi utilizado da maneira descrita acima. Numa etapa "a posteriori" esse critério foi refinado por meio de uma sondagem pelas principais configurações possíveis de um sistema. A sondagem é feita nas configurações que seriam descartadas. Antes de

serem descartadas são realizadas nessas configurações manobras com as chaves que ainda não foram fechadas. Por exemplo, na figura 3.5, nas configurações do nível n_0 , ou configuração inicial, foi fechada apenas uma chave e as configurações 03, 04 e 05 seriam descartadas pelo critério de corte. Ao ser aplicado o refinamento, seriam fechadas nas configurações descartadas, as chaves que ainda não foram manobradas, ou seja, se o sistema tem 3 chaves abertas na configuração inicial e foi fechada apenas uma delas, devem ser analisadas pela queda de tensão as configurações que seriam geradas pelo chaveamento das outras duas chaves abertas, realizando desse modo uma busca mais abrangente. Esta técnica mais genérica e refinada será descrita e discutida a seguir.

Na discussão da heurística de corte de configurações não factíveis utilizando o critério do limite máximo de queda de tensão será utilizada uma argumentação baseada na técnica de indução finita e para tal discussão será utilizado o sistema hipotético de 32 barras [8], com cinco chaves de interconexão da figura 3.6.

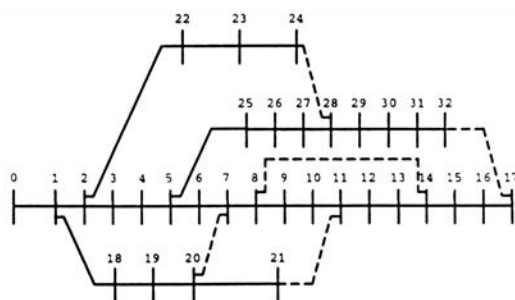


Figura 3.6 – Sistema hipotético de 32 barras.

Inicialmente serão feitas algumas convenções definindo *família* e *descendentes* de configurações no contexto da árvore de decisão do tipo "branch-and-bound", que facilitarão o entendimento das hipóteses adotadas e da discussão apresentada.

Família: Conjunto de configurações que tem $na-1$ número de chaves abertas comuns, em que na é o número total de chaves abertas do sistema. A noção de família deve ser tida como configurações que tem como descendentes um conjunto de configurações com topologia semelhante e com características ou propriedades

análogas. Em outras palavras as famílias representam um sub-espço de busca de configurações.

Descendente: Cada configuração que pertence a uma mesma família. Portanto, têm características semelhantes em consequência do grau de parentesco próximo. Os descendentes de cada família, quando as chaves são combinadas uma a uma na configuração inicial, serão as famílias quando as chaves abertas forem combinadas duas a duas, que por sua vez gerarão outros descendentes, que serão famílias para a combinação três a três e assim por diante, até a combinação *na a na* das chaves abertas da configuração inicial. O grau de parentesco entre as famílias vai diminuindo ao passo que o número de chaves abertas comuns vai diminuindo, de modo que as configurações tenham cada vez menos características semelhantes.

Seja a configuração inicial para o sistema de 32 barras mostrado na figura 3.6. Esta configuração apresenta 5 chaves abertas que ao longo do processo de busca serão combinadas para serem fechadas uma a uma, duas a duas, três a três, quatro a quatro até cinco a cinco, objetivando obter as configurações possíveis para o sistema. Ao serem fechadas na configuração inicial as chaves abertas uma a uma, será obtido um número de famílias igual ao número de chaves abertas.

Estas famílias estão representadas na figura 3.7 (a), (b), (c), (d) e (e), em que cada uma delas tem 4 chaves abertas comuns e seus descendentes serão gerados com a abertura de cada uma das chaves dos laços indicados na figura 3.7 (a.1), (b.1), (c.1), (d.1) e (e.1). O conjunto de descendentes está relacionado com a abertura de um laço com vistas a restabelecer a radialidade do sistema. Isto significa que o grau de parentesco dos descendentes é próximo, havendo muito pouca diferença entre eles. Considerando a figura 3.7 (a.1) que mostra o laço formado pelas chaves 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-7, 7-20, 20-19, 19-18 e 18-1; a abertura de cada uma das chaves desse laço de modo a restaurar a radialidade da rede dará origem a um conjunto de descendentes ilustrado pela figura 3.8 (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h) e (i).



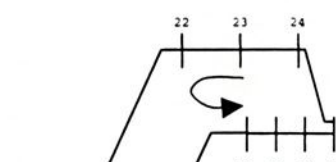
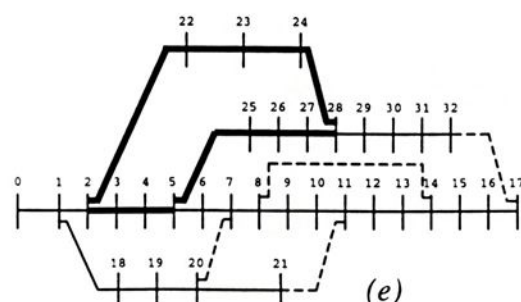
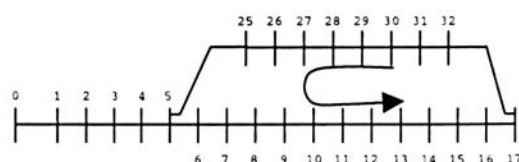
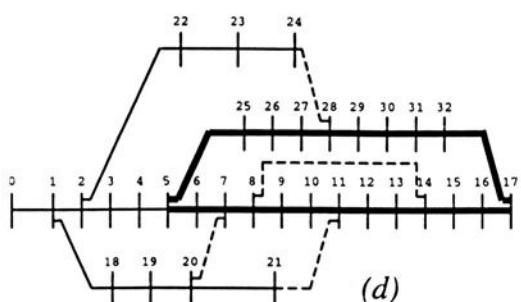
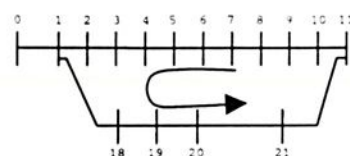
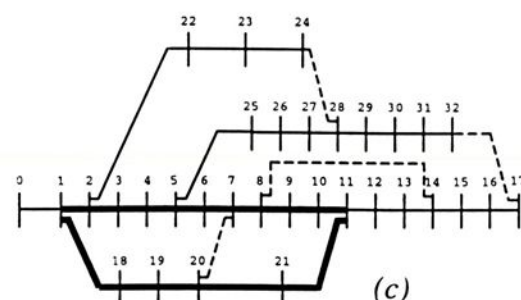
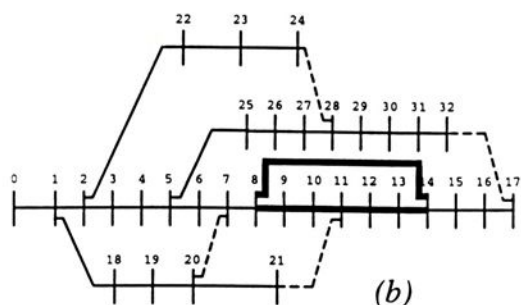
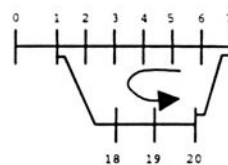
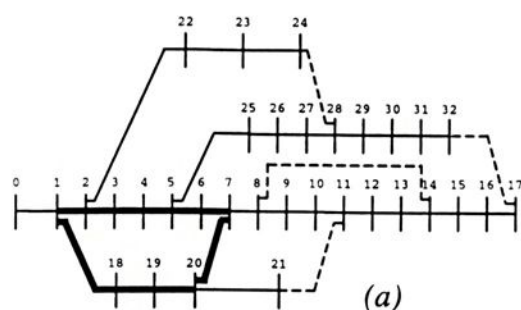


Figura 3.7 – Famílias geradas com as chaves abertas da configuração inicial no sistema de 32 barras combinadas uma a uma e os respectivos laços.

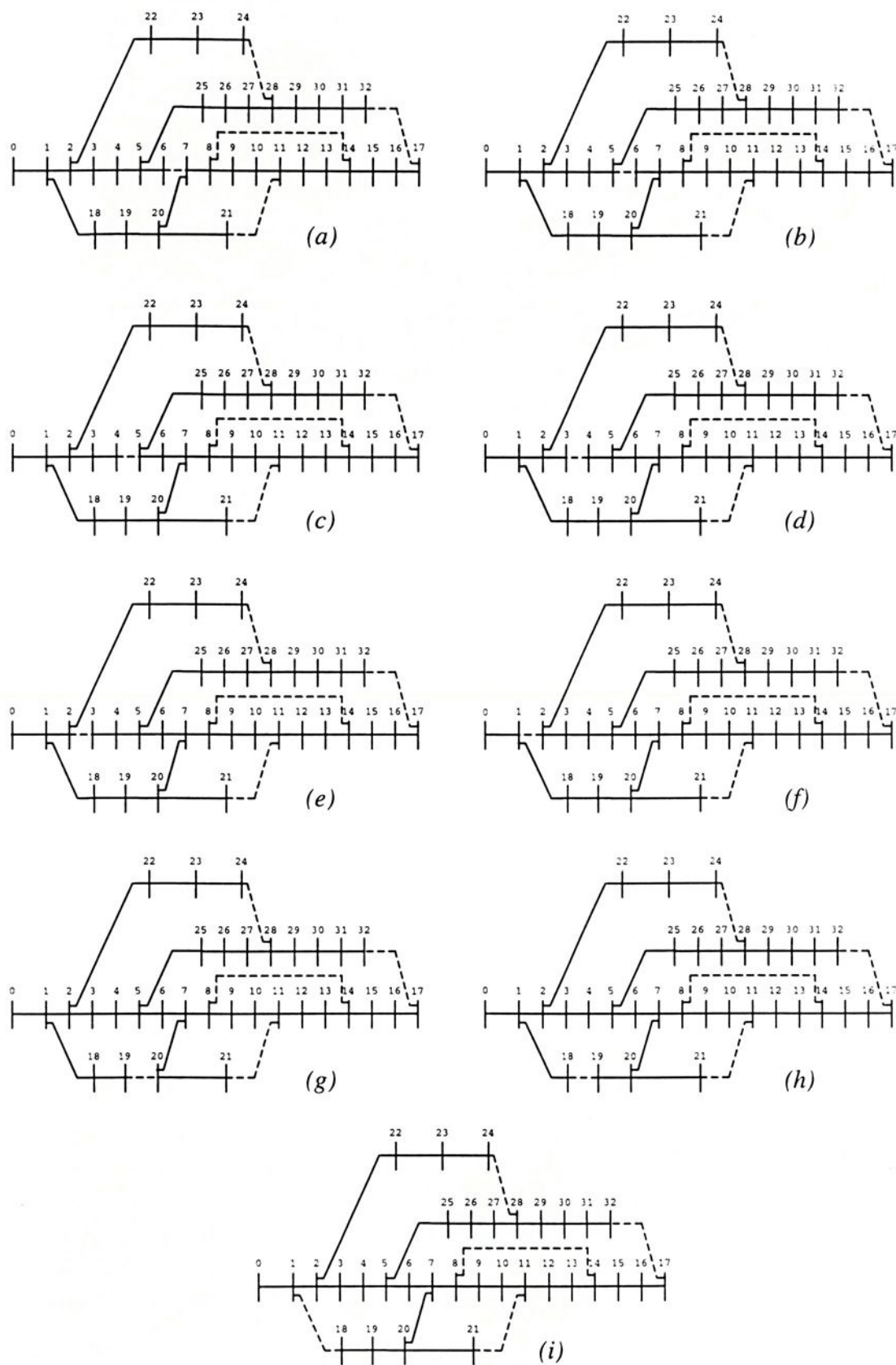


Figura 3.8 – Configurações descendentes da configuração da figura 3.7 (a).

A metodologia proposta para analisar as configurações e efetuar o corte no espaço de busca, conforme já ressaltado várias vezes, consiste do máximo limite de queda de tensão aliado ao coeficiente de balanço de carga; e de acordo com essa metodologia analisam-se as famílias possíveis de serem geradas para um sistema qualquer. Considere o conjunto de descendentes gerados a partir da família da figura 3.7 (a), mostrado na figura 3.8. Se todos esses descendentes apresentarem um limite de queda de tensão superior ao permitido pela heurística, eles serão descartados e não será permitido que gerem novos descendentes. Pelos conceitos de família e de corte de configurações apresentados neste trabalho, antes de se concluir pelo corte nesta fase do processo de busca, deve-se analisar o comportamento das famílias que estes descendentes estão relacionados e que ainda não foram sondadas. Considere por exemplo o descendente da figura 3.8 (a). As famílias relacionadas a este descendente estão apresentadas na figura 3.9, e de acordo com a metodologia proposta deverão ser analisadas através do critério da máxima queda de tensão. Através desta análise, se nenhuma configuração descendente destas famílias apresentar limites aceitáveis de queda de tensão, então com boa margem de segurança, pode-se cortar todos os descendentes e as novas famílias possíveis de serem geradas.

Pelas figuras 3.8 e 3.9 nota-se a semelhança ou o parentesco entre as configurações podendo-se afirmar que mesmo que fosse descartada alguma dessas configurações mas gerando o conjunto de todas as famílias a partir da árvore de decisão, investigou-se as principais configurações que são possíveis gerar para uma rede qualquer.

Pelas ilustrações anteriores em que se mostra o parentesco entre as configurações em uma mesma família-descendentes e o parentesco entre as famílias, chega-se à conclusão de que não há a necessidade de visitar todas as configurações possíveis que constituem o conjunto de descendentes durante a busca das melhores configurações, mas sim as principais famílias.

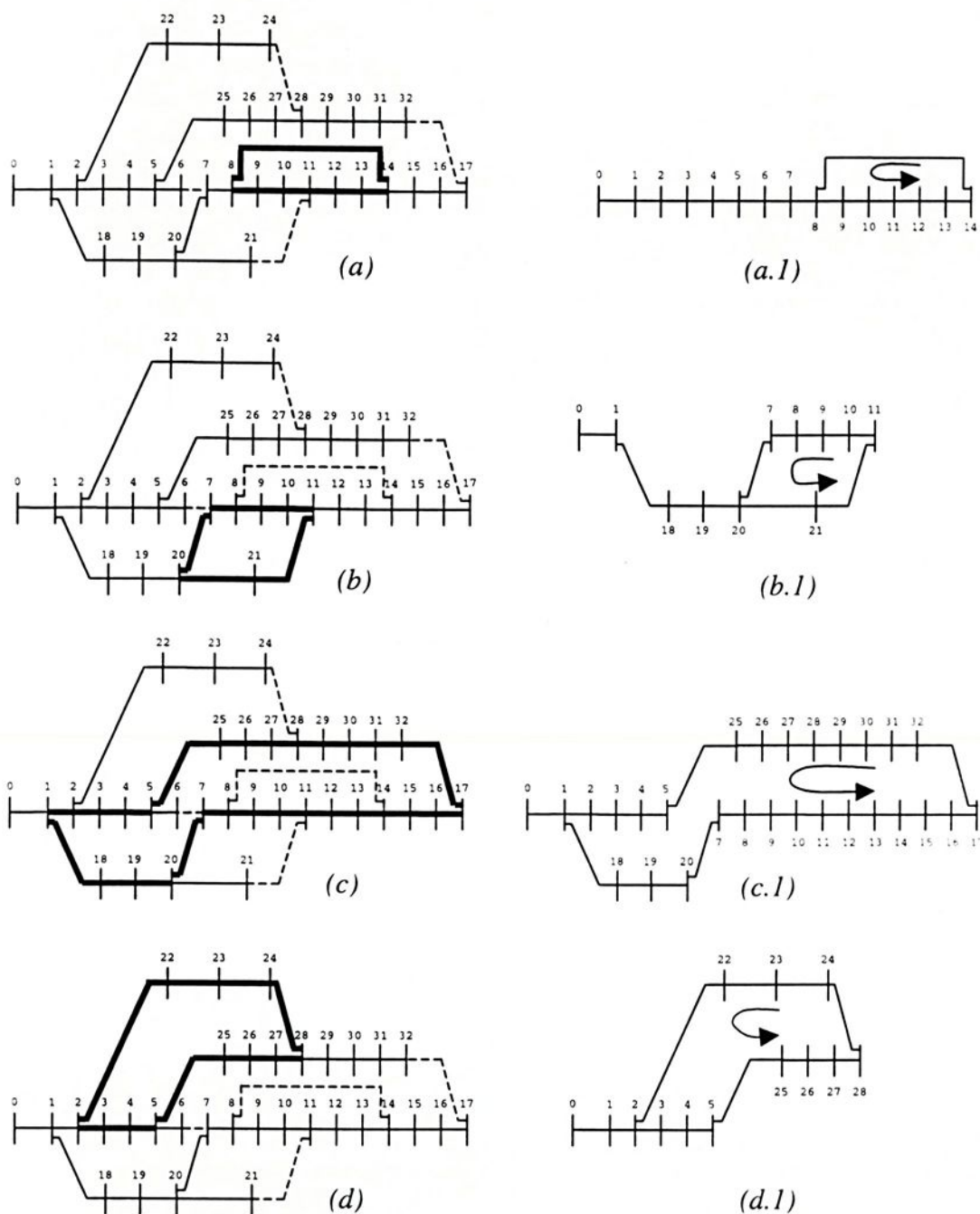


Figura 3.9 – Famílias geradas pela configuração da figura 3.8 (a).

3.5. Método aproximado de queda de tensão

O método de cálculo de fluxo de potência implementado é aproximado e tem o propósito de auxiliar o critério de corte de configurações tornando o algoritmo de

busca mais rápido e eficiente. É um processo iterativo simples em que se considera a modelagem da rede sem a inclusão de reguladores de tensão e será descrito a seguir.

Antes porém, é necessário ressaltar que um fator importante na implementação de qualquer metodologia de cálculo de fluxo de carga em redes radiais é a ordenação dos ramos do sistema. A ordenação influencia na velocidade e eficiência do método a ser implementado. Tendo um algoritmo de ordenação e varredura dos ramos do sistema adequado, qualquer método de cálculo de fluxo de carga pode ser facilmente implementado com sucesso.

O esquema de ordenação dos ramos utilizado neste trabalho é baseado em um esquema proposto por [22] para a preparação de dados no algoritmo de construção da matriz Z_{bus} para sistemas malhados. Neste esquema de ordenação os ramos do sistema são seqüenciados partindo do nó raiz ou referência, de maneira que é possível fazer a ligação do ramo selecionado a um ramo já ordenado. É claro que, para as redes radiais foram feitas algumas adequações no método. Ressalta-se também que o esquema de ordenação proposto por [22] apenas sugere um maneira de fazê-lo e não tem nenhuma sugestão no que diz respeito à implementação.

Segue agora a descrição do método de cálculo de fluxo de carga implementado. Supondo que o alimentador-I de acordo com a figura 3.9 tenha a tensão V_0 determinada e que as cargas nos pontos são dadas por $S_1, S_2, \dots, S_k$. A impedância de cada ramo é dada por $z_i = r_i + jx_i$.

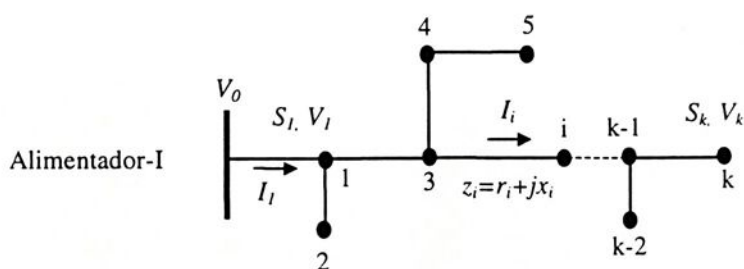


Figura 3.9 - Estrutura de um alimentador radial

O processo parte da concentração de carga em todos os nós do sistema. A concentração de carga em cada nó é feita somando-se todas as cargas ligadas ao mesmo, direta ou indiretamente, caminhando-se em direção contrária ao alimentador ou subestação. Para isso é feita uma busca na listagem dos ramos onde é verificado se existem ramificações em cada nó do alimentador, o que torna a busca um pouco trabalhosa e depende da ordenação feita previamente.

$$Sconc_i = \sum_{j=i+1}^k S_j \quad (3.1)$$

Em que $Sconc$ é vetor carga acumulada.

Depois de feita esta concentração de cargas pode-se calcular a corrente I_i no ramo i , de acordo com a equação abaixo:

$$I_i^{*(p)} = \frac{Sconc_i}{V_{i-1}^{(p)}} \quad (3.2)$$

Em que p indica a iteração em que está o processo.

Note que aqui a corrente obtida é o seu conjugado complexo. Também observa-se que a tensão utilizada para calcular a corrente no ramo i é aquela do nó emissor do ramo. Com a corrente no ramo calcula-se a queda de tensão no mesmo.

$$\Delta V_i^{(p)} = Z_i * I_i^{(p)} \quad (3.3)$$

E assim determina-se a tensão no nó receptor do ramo subtraindo essa queda da tensão do nó emissor do ramo.

$$V_i^{(p)} = V_{i-1}^{(p)} - \Delta V_i^{(p)} \quad (3.4)$$

Tem-se então, a tensão aproximada em todos os nós do sistema. Isto é feito para cada alimentador do sistema, se houver mais de um.

O teste de convergência é feito pela comparação entre as tensões da iteração corrente com a iteração anterior.

$$\Delta V_{Tol} = V_i^{(p)} - V_i^{(p-1)} \quad (3.5)$$

Se ΔV_{Tol} de algum nó do sistema for maior que uma tolerância especificada o processo é repetido até atingir a convergência.

3.6. Coeficiente de balanço de carga

O coeficiente de balanço de carga foi proposto a título de demonstração da eficiência do método de corte de configurações pelo critério de queda de tensão e é baseado na relação de carga-distância elétrica, ou seja, a resistência entre a carga e o alimentador, em que a relação carga-distância elétrica está diretamente relacionada com a capacidade de condução de cada alimentador e também as perdas.

Abaixo serão descritos dois processos de cálculo e logo após as três interpretações do coeficiente de balanço de carga. O processo de cálculo também envolve aspectos particulares de programação semelhantes aos do cálculo de fluxo de carga.

De acordo com a figura 3.9 utilizam-se as mesmas considerações feitas na descrição do método de fluxo de carga aproximado em que as cargas nos pontos são dadas por $S_1, S_2, \dots, S_k$ e a impedância de cada ramo é dada por $z_i = r_i + jx_i$.

O processo parte da concentração de carga em todos os nós do sistema, do mesmo modo que é feita para o método de cálculo de fluxo. Considerando o ponto k da figura 3.9 como a extremidade de uma chave de interconexão, o coeficiente de balanço de carga (cbc) para este lado da chave foi calculado de duas maneiras:

$$cbc = \sum_{i \in L} \frac{P_{conc_i}}{r_i} \quad (3.6)$$

$$cbc = \sum_{i \in L} P_{conc_i} \cdot r_i \quad (3.7)$$

Em que L é o conjunto de pontos de carga que ligam diretamente a extremidade da chave ao alimentador sem levar em conta as ramificações, P_{conc} é a parte real da potência complexa concentrada e r é a parte real da impedância do ramo. Dessa forma, o coeficiente de balanço de carga deve ser calculado para as duas extremidades de cada chave de interconexão.

Desde que o trabalho tem como objetivo a idéia de reduzir perdas ativas no sistema de modo geral, tendo uma certa noção de que a redução de perdas está diretamente relacionada com o balanço de carga entre os alimentadores, as três avaliações para o coeficiente de balanço de carga são realizadas de modo que se tenha um parâmetro que indique o quanto o sistema está desbalanceado e o mesmo possa ser utilizado para auxiliar na resolução do problema de reconfiguração. Aqui o termo desbalanceado significa a relação carga-capacidade não está bem distribuída entre os alimentadores. Assim quanto mais desbalanceado, maiores serão as perdas.

Num primeiro instante foi utilizada a equação 3.6 para o cálculo do cbc com a seguinte avaliação para os coeficientes de balanço de carga nas extremidades de cada chave:

$$Percent = \frac{|cbc_{in} - cbc_{fi}|}{Max(cbc_{in}, cbc_{fi})} \quad (3.8)$$

Em que:

- *Percent*: diferença percentual entre os coeficientes dos dois lados da chave;
- cbc_{in} , cbc_{fi} : coeficiente de balanço de carga para as duas extremidades da chave (inicial e final respectivamente);
- $Max(cbc_{in}, cbc_{fi})$: maior valor entre os dois coeficientes.

Por essa avaliação, o parâmetro *Percent* representa a diferença percentual entre os dois coeficientes, dando uma idéia de quanto é a diferença entre as duas relações carga-capacidade, ou seja, fornece a diferença do nível de carregamento entre os dois lados da chave de interconexão.

Para uma segunda avaliação foi utilizada a equação 3.7 para o cálculo do *cbc* e a equação 3.8 obtendo uma conclusão semelhante à avaliação anterior.

Na terceira avaliação foi utilizada a equação 3.7 para o cálculo do *cbc* e a seguinte equação:

$$Percent = \frac{cbcin}{cbcin + cbcf} \quad (3.9)$$

Nesta avaliação foi verificada a porcentagem que cada coeficiente tem em relação ao total da relação carga-capacidade. Por essa avaliação, verifica-se a distribuição das cargas por alimentador, podendo ser notado que nas melhores configurações o parâmetro *Percent* tende a ficar mais próximo de 50, ou seja, 50% da relação carga-capacidade para cada lado da chave.

Desse modo as maneiras de cálculo do coeficiente de balanço de carga e sua interpretação foram divididos em três tipos de coeficientes:

— CBC-01:

$$\left. \begin{aligned} CBC01 &= \sum_{i \in L} \frac{P_{conc_i}}{r_i} & (a) \\ Percent &= \frac{|cbcin - cbcfi|}{Max(cbcin, cbcf)} & (b) \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

— CBC-02:

$$\left. \begin{aligned} CBC02 &= \sum_{i \in L} P_{conc_i} \cdot r_i & (a) \\ Percent &= \frac{|cbcin - cbcfi|}{Max(cbcin, cbcf)} & (b) \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

— CBC-03:

$$\left. \begin{aligned} CBC03 &= \sum_{i \in L} P_{conc_i} \cdot r_i & (a) \\ Percent &= \frac{cbcin}{cbcin + cbcf} & (b) \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

O CBC-03 também foi utilizado como critério de corte das configurações. O critério é semelhante ao critério de corte por queda de tensão, em que são mantidas ativas as configurações mais atrativas para próximos chaveamentos. No caso do CBC-03 foram realizados testes mantendo ativas para os próximos chaveamentos as 3, 4 e 5 melhores configurações. As melhores configurações são aquelas em que o parâmetro *Percent* está mais próximo de 50. Este critério funciona bem para sistemas pequenos pois foram obtidos os mesmos obtidos pelo critério de corte pela queda de tensão, mas para sistemas de tamanho real, tomando 3, 4 ou 5 configurações após cada chaveamento o número de configurações geradas cresce muito tornando o espaço de busca de tamanho não gerenciável.

3.7. O Algoritmo

A partir da metodologia proposta e analisada neste trabalho, apresenta-se o algoritmo completo para a solução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica com vistas a estabelecer o planejamento da operação. O mesmo foi implementado em Fortran e os passos detalhados seguidos pelo algoritmo implementado estão descritos abaixo:

Passo (i) - Identificar a configuração inicial;

Passo (ii) - Fechar chave de interconexão inicialmente aberta;

Passo(iii) - Identificar nos níveis anteriores a configuração a ser chaveada.

Passo (iv) - Examinar as configurações geradas pelo chaveamento.

Para cada configuração gerada:

- (a) verificar a sua singularidade;
- (b) processar o fluxo de potência radial para a configuração;
- (c) verificar o limite de queda de tensão para cada alimentador;
- (d) se a maior queda de tensão da configuração está dentro do limite predeterminado, adicionar a configuração encontrada na listagem do nível n_i e calcular a perda da mesma, caso contrário aplicar refinamento;
- (e) o refinamento consiste em efetuar chaveamento com as chaves de interconexão ainda não fechadas. Se alguma configuração descendente tiver queda de tensão acima do limite predeterminado, adicionar configuração em lista separada.

Passo (v) - Foram tomadas todas as configurações encontradas nos níveis anteriores? Se sim ir ao *passo (vi)*, se não voltar ao *passo (iii)*;

Passo (vi) - Foram fechadas todas as chaves de interconexão inicialmente abertas? Se sim ir ao *passo (vii)*, se não voltar ao *passo (ii)*;

Passo(vii) - Escolher dentre as configurações encontradas um conjunto de tamanho também predeterminado das melhores configurações, isto é, as que têm a menor perda.

Passo (viii) - Imprimir as melhores configurações encontradas com seus respectivos valores de perdas.

O algoritmo descrito acima retrata com detalhes o método implementado para a resolução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição. O item (d) do *passo iv* representa o refinamento adicionado ao método implementado inicialmente. A subrotina de refinamento do método para a resolução do problema de reconfiguração adicionada ao *passo iv* é processada justamente no ponto em que as configurações não passam pelo critério de queda de tensão.



O cálculo dos três tipos de coeficiente de balanço de carga é feito sem a adição da subrotina de refinamento no *passo iv* após serem encontradas as novas configurações. Para o caso do CBC-03 ser utilizado como critério de corte de configurações, o processo é semelhante ao critério de corte por queda de tensão em que são mantidas ativas para novo chaveamento um número fixo de configurações que tem coeficiente dentro de um limite predeterminado.

Abaixo tem-se o diagrama de blocos do algoritmo implementado mostrando passo a passo como é feita a sondagem e corte das configurações. A figura 3.10 ilustra o algoritmo de forma mais clara.

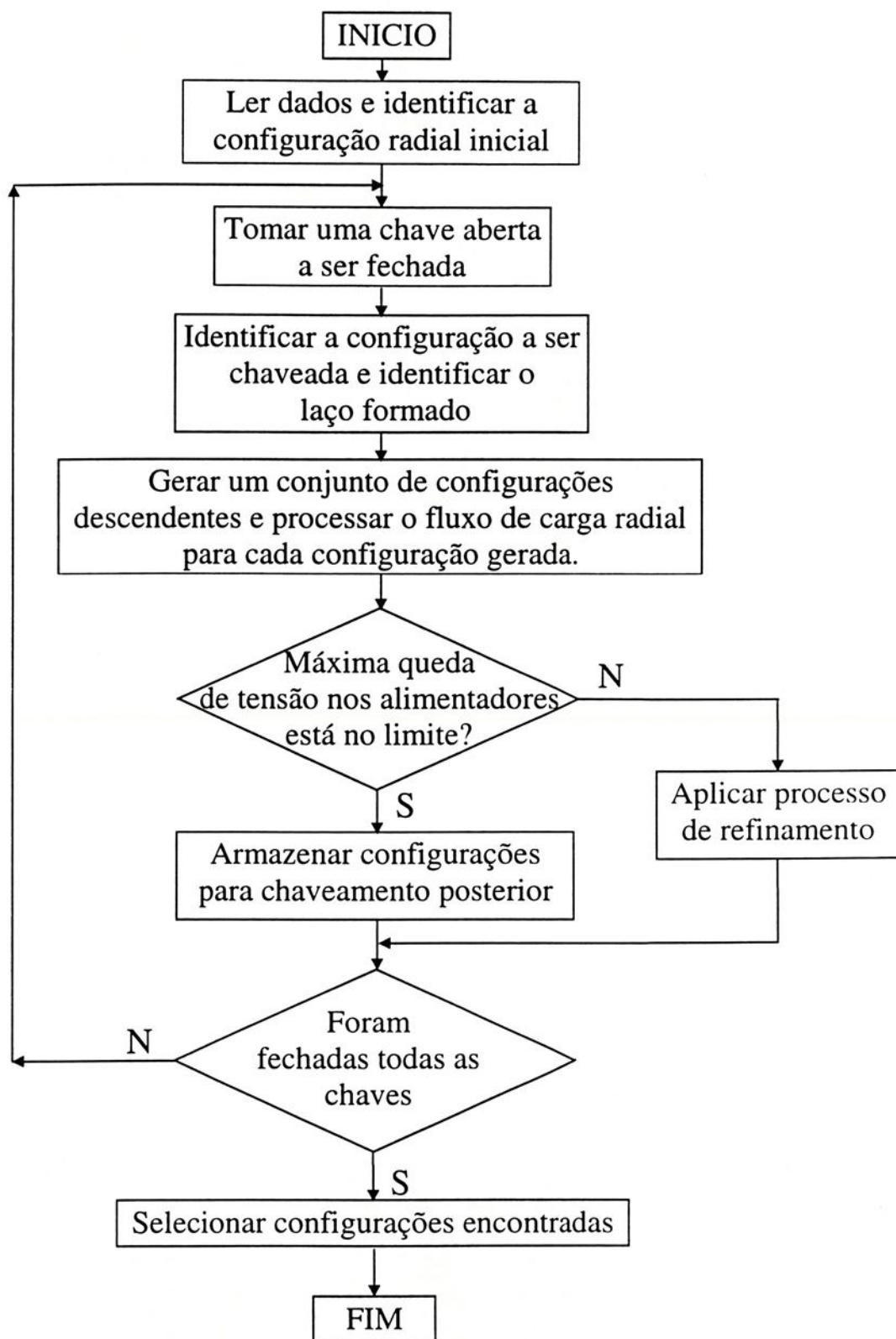


Figura 3.10 – Diagrama de blocos do algoritmo implementado

CAPÍTULO IV

Resultados Obtidos

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos testes com o algoritmo implementado aplicando o critério de corte de configurações pelo limite máximo de queda de tensão em três sistemas hipotéticos encontrados na literatura especializada e um sistema real. Também são apresentados resultados dos testes com o coeficiente de balanço de carga nos sistemas hipotéticos.

4.1. Introdução

Foram realizados testes com três sistemas hipotéticos conhecidos na literatura especializada e um sistema real para a obtenção dos resultados. O sistema real é sistema de distribuição de energia elétrica da Cidade de Três Lagoas e região da concessionária CESP. Os dados do sistema foram adquiridos na Gerência Geral de Atendimentos da CESP de Andradina. Nesses quatro sistemas testados as cargas são consideradas trifásicas equilibradas.

Para verificar a precisão do cálculo de queda de tensão utilizado neste trabalho e a adequação do mesmo aos propósitos desta pesquisa, que é a obtenção de um

método eficiente, rápido, simples e seguro para a análise e reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica, comparou-se então o método de fluxo de carga aproximado desenvolvido e implementado com um método iterativo tipo Newton desenvolvido para sistemas de alta tensão que apresenta uma boa precisão e segurança. Mas sabe-se que o método de Newton precisa partir de um ponto próximo à solução e por isso inicia-se o processo de cálculo de fluxo por esse método com a solução do cálculo de fluxo da configuração inicial de cada sistema testado encontrada com o método aproximado. A comparação é realizada calculando-se as perdas para a configuração inicial e as 10 melhores configurações encontradas de cada sistema testado pelos dois métodos.

4.2. Testes Realizados com o Critério de Corte de Configurações pela Queda de Tensão

Os resultados dos testes nos 04 sistemas são apresentados com o critério de corte de configurações sem a aplicação do processo de refinamento e também com a aplicação do processo refinamento. Para os três sistemas hipotéticos as 10 melhores configurações encontradas são as mesmas pelos dois processos, mas para o sistema real o conjunto das 10 melhores configurações não é o mesmo. Desse modo, para esse sistema serão apresentados os resultados pelos dois processos.

4.2.1. Sistema de 14 barras [1]

O primeiro sistema tem 14 barras, 3 chaves de interconexão, tensão 23 KV, potência base 100 MVA. As chaves de interconexão para a configuração inicial desse sistema são 15-21-26 e seus dados completos foram obtidos na referência [1] e encontram-se no Apêndice A.

Na Tabela-I estão os resultados da comparação dos dois métodos de fluxo de carga e na Tabela-II estão as chaves abertas das 10 melhores configurações encontradas para o sistema de 14 barras.



Tabela I: Perdas nas 10 melhores configurações para o sistema de 14 barras pelos métodos aproximado e de Newton.

Número da Configuração	Perdas em KW		Erro Percentual $EP = \frac{ P_1 - P_2 }{P_2} \cdot 100$
	Mét. Aprox. (P_1)	Mét. Newton (P_2)	
CI	499,1108	511,4352	2,4098%
01	456,0404	466,1273	2,1640%
02	468,6677	479,2967	2,2176%
03	473,9481	483,8695	2,0504%
04	480,7536	493,1538	2,5145%
05	482,2404	492,8344	2,1496%
06	487,0885	497,5506	2,1027%
07	487,6112	500,1432	2,5057%
08	497,4703	508,0264	2,0779%
09	499,1108	511,4352	2,4098%
10	500,7461	511,9407	2,1867%

Tabela II: Configuração inicial (CI) e 10 melhores configurações (sistema de 14 barras)

No. da Configuração	Chaves Abertas
CI	15-21-26
01	17-19-26
02	14-17-19
03	15-17-26
04	19-21-26
05	17-19-25
06	14-15-17
07	14-19-21
08	15-17-25
09	15-21-26
10	19-24-26

4.2.2. Sistema de 32 barras [2]

O segundo sistema tem 32 barras, 5 chaves de interconexão, tensão de 12,66 KV, potência base de 10 MVA. Para o sistema de 32 barras as chaves de interconexão são 33-34-35-36-37 para a configuração inicial e seus dados completos foram obtidos na referência [2] e encontram-se no Apêndice A.

Na Tabela-III estão os resultados da comparação dos dois métodos de fluxo de carga e na Tabela-IV estão as chaves abertas das 10 melhores configurações encontradas para o sistema de 32 barras.

Tabela III: Perdas nas 10 melhores configurações para o sistema de 32 barras pelos métodos aproximado e de Newton.

Número da Configuração	Perdas em KW		Erro Percentual $EP = \frac{ P_1 - P_2 }{P_2} \cdot 100$
	Mét. Aprox. (P_1)	Mét. Newton (P_2)	
CI	190,0268	202,6771	6,2416%
01	134,0814	139,5517	3,9199%
02	134,7552	140,2790	3,9377%
03	134,7929	139,9782	3,7044%
04	135,4667	140,7058	3,7234%
05	135,6109	141,2043	3,9612%
06	136,3224	141,6311	3,7483%
07	136,3230	142,1654	4,1096%
08	136,4952	141,9164	3,8200%
09	136,7989	142,6041	4,0709%
10	136,8032	142,6783	4,1177%



Tabela IV: Configuração inicial (CI) e 10 melhores configurações (sistema de 32 barras)

No. da Configuração	Chaves Abertas
CI	33-34-35-36-37
01	07-09-14-32-37
02	07-10-14-32-37
03	07-09-14-28-32
04	07-10-14-28-32
05	07-11-14-32-37
06	07-11-14-28-32
07	07-09-14-36-37
08	07-09-14-28-36
09	07-09-14-31-37
10	07-10-14-36-37

4.2.3. Sistema de 69 barras [8]

O terceiro sistema tem 69 barras, 5 chaves de interconexão, tensão 12,66 KV, potência base de 100 MVA. Para o sistema de 69 barras as chaves de interconexão são 70-71-72-73-74 para a configuração inicial e seus dados completos foram obtidos na referência [8] e encontram-se no Apêndice A.

Na Tabela-V estão os resultados da comparação dos dois métodos de fluxo de carga e na Tabela-VI estão as chaves abertas das 10 melhores configurações encontradas para o sistema de 69 barras.



Tabela V: Perdas nas 10 melhores configurações para o sistema de 69 barras pelos métodos aproximado e de Newton.

Número da Configuração	Perdas em KW		Erro Percentual $EP = \frac{ P_1 - P_2 }{P_2} \cdot 100$
	Mét. Aprox. (P_1)	Mét. Newton (P_2)	
CI	20,4475	20,7818	1,6086%
01	9,3526	9,3365	0,1721%
02	9,3526	9,3365	0,1721%
03	9,3526	9,3365	0,1721%
04	9,3526	9,3365	0,1721%
05	9,3601	9,3442	0,1699%
06	9,3601	9,3442	0,1699%
07	9,3601	9,3442	0,1699%
08	9,3601	9,3442	0,1699%
09	9,3686	9,3530	0,1665%
10	9,3686	9,3530	0,1665%

Tabela VI: Configuração inicial (CI) e 10 melhores configurações (sistema de 69 barras)

No. da Configuração	Chaves Abertas
CI	70-71-72-73-74
01	15-57-62-70-71
02	15-59-62-70-71
03	15-56-62-70-71
04	15-58-62-70-71
05	14-59-62-70-71
06	14-56-62-70-71
07	14-57-62-70-71
08	14-58-62-70-71
09	13-57-62-70-71
10	13-59-62-70-71

4.2.4. Sistema real (CESP-Três Lagoas) de 135 barras

O sistema real tem 135 barras, 21 chaves de interconexão, tensão 13,8 KV, potência base de 100 MVA. Para o sistema de 135 barras as chaves de interconexão são 136-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146-147-148-149-150-151-152-153-154-155-156 para a configuração inicial e seus dados completos foram obtidos junto à Gerência Central de Atendimentos da CESP de Andradina-SP e encontram-se no Apêndice A.

Na Tabela-VII estão os resultados da comparação dos dois métodos de fluxo de carga para o sistema de 135 barras calculados para as 10 melhores configurações encontradas sem a aplicação do refinamento, na Tabela-VIII (a) estão as chaves abertas das 10 melhores configurações encontradas sem a aplicação do refinamento e na Tabela-VIII (b) estão as 10 melhores configurações encontradas para o mesmo sistema com a aplicação do refinamento ao método proposto com suas respectivas perdas calculadas apenas pelo método aproximado.

Tabela VII: Perdas nas 10 melhores configurações para o sistema real de 135 barras sem a aplicação do refinamento pelos métodos aproximado e de Newton.

Número da Configuração	Perdas em KW		Erro Percentual $EP = \frac{ P_1 - P_2 }{P_1} \cdot 100$
	Mét. Aprox. (P_1)	Mét. Newton (P_2)	
CI	311,3050	320,1734	2,7699%
01	280,6910	286,2461	1,9407%
02	280,6910	286,2461	1,9407%
03	280,8573	286,4226	1,9430%
04	280,8573	286,4226	1,9430%
05	280,9195	286,4860	1,9430%
06	280,9195	286,4860	1,9430%
07	281,9195	286,5936	1,6309%
08	281,9195	286,5936	1,6309%
09	281,0338	286,5878	1,9380%
10	281,0338	286,5878	1,9380%

Tabela VIII (a): Configuração inicial (CI) e 10 melhores configurações para o sistema de 135 barras sem a aplicação do refinamento.

No. da Configuração	Chaves Abertas
CI	136-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146 147-148-149-150-151-152-153-154-155-156
01	136-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146 147-148-149-150-151-152-106-154-155-156
02	136-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146 147-148-149-150-151-152-106-154-155-135
03	136-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146 147-148-149-150-151-152-106-154-155-97
04	136-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146 147-148-149-150-151-152-106-154-155-98
05	136-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146 147-148-149-150-151-152-106-126-128-135
06	136-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146 147-148-149-150-151-152-106-126-128-156
07	136-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146 147-148-149-150-151-152-106-126-128-98
08	136-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146 147-148-149-150-151-152-106-126-128-97
09	136-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146 147-148-149-150-151-152-106-154-155-135
10	136-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146 147-148-149-150-151-152-106-154-155-156

Tabela VIII (b): 10 melhores configurações para o sistema de 135 barras com a aplicação do refinamento e suas respectivas perdas.

No. da Configuração	Chaves Abertas	Perdas em (KW) pelo Mét. Aproximado
01	136-137-138-139-51-141-142-143-144-145-146 147-148-149-150-151-152-106-154-155-	280,0617
02	136-9-138-139-140-141-142-143-144-145-146 147-148-149-150-151-152-106-154-155-156	280,3687
03	136-137-138-139-140-141-54-143-144-145-146 147-148-149-150-151-152-106-154-155-	280,3783
04	136-137-138-139-140-141-53-143-144-145-146 147-148-149-150-151-152-106-154-155-	280,3784
05	7-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146 147-148-149-150-151-152-106-154-155-156	280,4379
06	136-137-138-139-140-50-142-143-144-145-146 147-148-149-150-151-152-106-154-155-	280,7322
07	136-137-138-139-140-49-142-143-144-145-146 147-148-149-150-151-152-106-154-155-	280,7322
08	136-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146 147-148-90-150-151-152-106-154-155-156	280,7503
09	136-137-138-139-140-141-55-143-144-145-146 147-148-149-150-151-152-106-154-155-	280,8454
10	136-137-138-135-140-141-142-143-144-145-146 147-148-149-150-151-152-106-154-155-	281,0337

Nas Tabela-I, III, V e VII em que há a comparação entre as perdas obtidas pelo método aproximado implementado e pelo método de Newton, pode-se notar que a diferença percentual entre ambas é muito pequena. Os quatro sistemas têm topologia e cargas diferentes podendo testar a robustez do método de fluxo de carga implementado, mostrando que tem uma boa eficiência para o problema da reconfiguração.

Uma outra comparação que pode ser citada aqui está relacionada às tensões encontradas nos cálculos de fluxo da rede. Apesar de não terem sido citadas, as diferenças entre as tensões obtidas pelo método aproximado e pelo método de Newton são também muito pequenas, praticamente da mesma ordem ou menor ordem de grandeza das encontradas nas perdas.

Para os sistemas hipotéticos testados foram obtidos os mesmos resultados apresentados nas referências bibliográficas revisadas, mostrando que o algoritmo tem um bom desempenho. E com os resultados apresentados para o sistema real com a inclusão da subrotina de refinamento, pode-se afirmar que o algoritmo é também muito eficiente para resolver o problema de reconfiguração em sistemas reais.

Pela Tabela-VIII (b) na qual estão as 10 melhores configurações encontradas com a aplicação do refinamento, pode-se notar que não há muita diferença nas perdas das melhores configurações e também na topologia das mesmas. A pequena diferença entre as perdas das melhores configurações acontece em consequência de que o sistema possui muitos ótimos locais que diferem muito pouco entre si. Já a pequena diferença entre a topologia dessas configurações reforça a justificativa do bom funcionamento do método de busca de configurações radiais, da heurística de corte pelo critério de queda de tensão e enfim, do bom desempenho geral da metodologia desenvolvida e implementada.



4.3. Testes Realizados com os Coeficientes de Balanço de Carga

Foram realizados testes com três tipos de coeficientes de balanço de carga (CBC-01, CBC-02 e CBC-03). Os resultados com os coeficientes CBC-01 e CBC-2 são apenas preliminares de modo a estabelecer a forma mais adequada de cálculo e da utilização dos mesmos, chegando-se à conclusão de que a forma mais adequada seria o CBC-03. Assim, com o CBC-03 foram realizados testes utilizando-o como critério de corte de configurações, mantendo ativas no esquema de busca de configurações radiais implementado, 3, 4 e 5 configurações que tivessem os melhores coeficientes. Por meio dos testes com o CBC-03 nos três sistemas hipotéticos testados foram encontradas as mesmas configurações já encontradas pela aplicação do critério de corte de configurações por queda de tensão não havendo a necessidade de mostrá-las novamente. O resultados dos testes realizados são apresentados com cada coeficiente calculado para as configurações inicial e ótima dos três sistemas hipotéticos (14, 32 e 69 barras).

4.3.1. Resultados dos testes com o CBC-01

Como descrito no capítulo anterior o coeficiente de balanço de carga CBC-01 é calculado pela equação 3.10 (a) e a diferença percentual entre os coeficientes dos dois lados de uma mesma chave (*Percent*) é calculado pela equação 3.10 (b) aqui apresentadas na seguinte equação:

$$\left. \begin{aligned} CBC01 &= \sum_{i \in L} \frac{P_{conc_i}}{r_i} \quad (a) & Percent &= \frac{|cbc_{in} - cbc_{fi}|}{Max(cbc_{in}, cbc_{fi})} \quad (b) \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Nas Tabelas-IX (a), X (a) e XI (a) estão os coeficientes calculados para as configurações iniciais e nas Tabelas-IX (b), X (b) e XI (b) estão os coeficientes calculados para a configuração ótima dos sistemas de 14, 32 e 69 barras respectivamente.

Tabela IX (a) – Coeficientes de balanço de carga CBC-01 para a configuração inicial do sistema de 14 barras.

Chave	Cbcin	Cbcfi	Difer. Perc.
15	1,50833	2,68977	43,92 %
21	1,46364	0,57475	60,73 %
26	1,89722	1,37614	27,47 %

Tabela IX (b) – Coeficientes de balanço de carga CBC-01 para a configuração ótima do sistema de 14 barras.

Chave	Cbcin	Cbcfi	Percent
17	2,41477	1,81333	24,91 %
19	1,22727	1,02677	16,34 %
26	1,97722	1,46705	25,80 %

Tabela X (a) – Coeficientes de balanço de carga CBC-01 para a configuração inicial do sistema de 32 barras.

Chave	Cbcin	Cbcfi	Percent
33	44,46103	4,51044	89,86 %
34	45,51138	55,54100	18,06 %
35	53,16334	4,71392	91,13 %
36	56,37556	52,40973	7,03 %
37	16,13617	48,08513	66,44 %

Tabela X (b) – Coeficientes de balanço de carga CBC-01 para a configuração ótima do sistema de 32 barras.

Chave	Cbcin	Cbcfi	Percent
07	22,10199	18,77671	15,05 %
09	20,11550	19,64803	2,32 %
14	19,38358	20,50250	5,46 %
32	37,61116	21,00976	44,14 %
37	13,09646	34,16646	61,67 %

Tabela XI (a) – Coeficientes de balanço de carga CBC-01 para a configuração inicial do sistema de 69 barras.

Chave	Cbcin	Cbcfi	Percent
70	47,62928	35,84277	24,75 %
71	47,63508	47,91785	0,59 %
72	47,51035	47,79898	0,60 %
73	47,94517	47,86747	0,16 %
74	47,63838	35,90917	24,62 %

Tabela XI (b) – Coeficientes de balanço de carga CBC-01 para a configuração ótima do sistema de 69 barras.

Chave	Cbcin	Cbcfi	Percent
15	44,57383	38,81181	12,93 %
57	44,57555	43,74898	1,85 %
62	44,56310	47,37815	5,94 %
70	47,40846	43,93528	7,33 %
71	44,57559	43,07661	3,36 %

Pelos coeficientes apresentados nas Tabelas-IX (a), X (a) e XI (a) para as configurações iniciais nota-se o desequilíbrio da carga pelo valor do parâmetro *Percent* e nas Tabelas-IX (b), X (b) e XI (b) para as configurações ótimas nota-se que o desequilíbrio diminuiu. Pode-se concluir então que ao se aproximar da configuração ótima o valor da diferença entre os dois coeficientes tende diminuir, e consequentemente o desequilíbrio das cargas entre os alimentadores também tende a diminuir. Apesar da sensível mudança na diferença percentual entre os coeficientes não foi possível encontrar um parâmetro baseado nessa diferença que pudesse ser aplicado para auxiliar a metodologia na resolução do problema de reconfiguração em questão.

4.3.2. Resultados dos testes com o CBC-02

Como também descrito no capítulo anterior o coeficiente de balanço de carga CBC-02 é calculado pela equação 3.11 (a) e a diferença percentual entre os coeficientes dos dois lados de uma mesma chave (*Percent*) é calculado pela equação 3.11 (b) aqui apresentadas na seguinte equação:

$$CBC02 = \sum_{i \in L} P_{conc_i} \cdot r_i \quad (a)$$

$$Percent = \frac{|cbcin - cbcfi|}{Max(cbcin, cbcf)} \quad (b)$$

$$\left. \vphantom{\sum_{i \in L} P_{conc_i} \cdot r_i} \right\} (4.2)$$

Nas Tabelas-XII (a), XIII (a) e XIV (a) estão os coeficientes calculados para as configurações iniciais e nas Tabelas-XII (b), XIII (b) e XIV (b) estão os coeficientes calculados para a configuração ótima dos sistemas de 14, 32 e 69 barras respectivamente.

Tabela XII (a) – Coeficientes de balanço de carga CBC-02 para a configuração inicial do sistema de 14 barras.

Chave	Cbcin	Cbcfi	Percent
15	0,00877	0,02535	65,38 %
21	0,01771	0,00651	63,24 %
26	0,01013	0,00893	11,80 %



Tabela XII (b) – Coeficientes de balanço de carga CBC-02 para a configuração ótima do sistema de 14 barras.

Chave	Cbcin	Cbcfi	Percent
17	0,02245	0,00995	55,7016 %
19	0,01485	0,00891	40,0000 %
26	0,01058	0,01003	05,1537 %

Tabela XIII (a) – Coeficientes de balanço de carga CBC-02 para a configuração inicial do sistema de 32 barras.

Chave	Cbcin	Cbcfi	Percent
33	44,46103	4,51044	89,86 %
34	45,51138	55,54100	18,06 %
35	53,16334	4,71392	91,13 %
36	56,37556	52,40973	7,03 %
37	16,13617	48,08513	66,44 %

Tabela XIII (b) – Coeficientes de balanço de carga CBC-02 para a configuração ótima do sistema de 32 barras.

Chave	Cbcin	Cbcfi	Percent
07	22,10199	18,77671	15,05 %
09	20,11550	19,64803	2,32 %
14	19,38358	20,50250	5,46 %
32	37,61116	21,00976	44,14 %
37	13,09646	34,16646	61,67 %

Tabela XIV (a) – Coeficientes de balanço de carga CBC-02 para a configuração inicial do sistema de 69 barras.

Chave	Cbcin	Cbcfi	Percent
70	0,00641	0,00010	98,46 %
71	0,00793	0,01002	20,87 %
72	0,00047	0,01668	97,21 %
73	0,01014	0,02029	50,00 %
74	0,00935	0,00010	98,89 %

Tabela XIV (b) – Coeficientes de balanço de carga CBC-02 para a configuração ótima do sistema de 69 barras.

Chave	Cbcin	Cbcfi	Percent
15	0,00215	0,00181	16,02 %
57	0,00251	0,00493	49,13 %
62	0,00132	0,00684	80,66 %
70	0,00915	0,00749	18,11 %
71	0,00253	0,00330	23,41 %

Pelos coeficientes apresentados nas Tabelas-XII (a), XIII (a) e XIV (a) para as configurações iniciais nota-se o desequilíbrio da carga pelo valor do parâmetro *Percent* e nas Tabelas-XII (b), XIII (b) e XIV (b) para as configurações ótimas nota-se que o desequilíbrio diminuiu. Mas ainda que, o valor da diferença entre os dois coeficientes tende diminuir ao se aproximar da configuração ótima, e conseqüentemente o desequilíbrio das cargas entre os alimentadores também tender a diminuir não foi possível encontrar um parâmetro baseado nessa diferença que pudesse ser aplicado para auxiliar a metodologia na resolução do problema de reconfiguração em questão. Aqui os valores das diferenças percentuais são ainda mais difíceis de serem analisados do que no caso do CBC-01.

4.3.3. Resultados dos testes com o CBC-03

Também descrito no capítulo anterior o coeficiente de balanço de carga CBC-03 é calculado pela equação 3.12 (a) e o parâmetro *Percent* é calculado pela equação 3.12 (b) aqui apresentadas na seguinte equação:

$$CBC03 = \sum_{i \in L} P_{conc_i} \cdot r_i \quad (a)$$
$$Percent = \frac{cbcin}{cbcin + cbcf} \quad (b)$$

(4.3)

Nas Tabelas-XV (a), XVI (a) e XVII (a) estão os coeficientes calculados para as configurações iniciais e nas Tabelas-XV (b), XVI (b) e XVII (b) estão os coeficientes calculados para a configuração ótima dos sistemas de 14, 32 e 69 barras respectivamente.

Tabela XV (a) – Coeficientes de balanço de carga CBC-03 para a configuração inicial do sistema de 14 barras.

Chave	Cbcin	Cbcfi	Percent
15	0,00878	0,02535	25,71 %
21	0,01771	0,00651	73,12 %
26	0,01013	0,00893	53,14 %

Tabela XV (b) – Coeficientes de balanço de carga CBC-03 para a configuração ótima do sistema de 14 barras.

Chave	Cbcin	Cbcfi	Percent
17	0,02245	0,00995	69,3008 %
19	0,01485	0,00891	62,5000 %
26	0,01597	0,01003	51,3225 %

Tabela XVI (a) – Coeficientes de balanço de carga CBC-03 para a configuração inicial do sistema de 32 barras.

Chave	Cbcin	Cbcfi	Percent
33	22,10199	18,77671	87,34 %
34	20,11550	19,64803	43,64 %
35	19,38358	20,50250	89,09 %
36	37,61116	21,00976	53,52 %
37	13,09646	34,16646	32,92 %

Tabela XVI (b) – Coeficientes de balanço de carga CBC-03 para a configuração ótima do sistema de 32 barras.

Chave	Cbcin	Cbcfi	Percent
07	22,10199	18,77671	45,68 %
09	20,11550	19,64803	45,04 %
14	19,38358	20,50250	53,21 %
32	37,61116	21,00976	50,37 %
37	13,09646	34,16646	37,50 %

Tabela XVII (a) – Coeficientes de balanço de carga CBC-03 para a configuração inicial do sistema de 69 barras.

Chave	Cbcin	Cbcfi	Percent
70	0,00641	0,00010	98,48 %
71	0,00793	0,01002	44,17 %
72	0,00047	0,01668	2,72 %
73	0,01014	0,02029	33,33 %
74	0,00935	0,00010	98,90 %

Tabela XVII (b) – Coeficientes de balanço de carga CBC-03 para a configuração ótima do sistema de 69 barras.

Chave	Cbcin	Cbcfi	Percent
15	0,00215	0,00181	54,35 %
57	0,00251	0,00493	33,72 %
62	0,00132	0,00684	16,21 %
70	0,00915	0,00749	54,98 %
71	0,00253	0,00330	43,37 %

Para o CBC-03 o parâmetro *Percent* é avaliado como sendo a porcentagem que o Cbcin, ou seja, o coeficiente do nó tido como o início de uma chave, tem em relação ao total ou a soma dos dois coeficientes. Assim a análise do parâmetro *Percent* deve ser vista como melhora se o mesmo tende a ficar próximo de 50% para cada chave.

Pela análise vista da forma descrita acima, os coeficientes apresentados nas Tabelas-XV (a), XVI (a) e XVII (a) para as configurações iniciais mostram o desequilíbrio da carga pelo valor do parâmetro *Percent* e nas Tabelas-XV (b), XVI (b) e XVII (b) para as configurações ótimas nota-se também que o desequilíbrio diminuiu. Aqui nota-se realmente que o valor do parâmetro *Percent* tende a ficar próximo de 50% ao se aproximar da configuração ótima, e consequentemente o desequilíbrio das cargas entre os alimentadores também tender a diminuir. Desse modo pelo CBC-03 foi possível encontrar parâmetro que pôde ser aplicado para auxiliar a metodologia na resolução do problema de reconfiguração em questão e como dito anteriormente o CBC-03 foi utilizado como critério de corte de configurações mantendo ativas, no esquema de busca de configurações radiais implementado, 3, 4 e 5 configurações que tivessem os melhores coeficientes.

CONCLUSÕES

Neste trabalho apresenta-se um algoritmo heurístico simples, eficiente e robusto na resolução do problema da reconfiguração de redes radiais de sistemas de distribuição. Como parte da metodologia proposta está envolvida a obtenção do estado da rede para cada configuração radial, necessitando de um programa de fluxo de carga radial rápido e eficiente, dado o elevado número de vezes que o mesmo tem que ser processado durante o processo de solução. Baseado nesse aspecto, foi implementado um programa de cálculo de fluxo de carga radial que se mostrou adequadamente preciso e rápido no auxílio à busca da solução para o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica. Os testes comparativos entre o método de cálculo de fluxo aproximado implementado e o método que usa o algoritmo de Newton mostra sua eficiência e robustez. Salienta-se que, o objetivo não foi a discussão genérica do problema de fluxo carga em redes radiais, mas sim uma técnica simples e eficiente para calcular o estado da rede e auxiliar na solução do problema de reconfiguração, independente do algoritmo adotado para efetuar estudos de reconfiguração.

O critério do limite máximo de queda de tensão utilizado para efetuar o corte de configurações também se mostrou eficiente em consequência da maneira como é realizada a busca de configurações radiais. Também pelo coeficiente de balanço de carga demonstrou-se a eficácia do método de poda na árvore de configurações pelo critério do limite máximo de queda de tensão.

O programa computacional desenvolvido a partir da metodologia proposta fornece como resultado um conjunto de configurações com os menores valores de perdas. Estes valores de perdas, dependendo do sistema analisado, são muito próximos, mostrando que às vezes não há alterações significativas nos valores das perdas quando se passa de uma configuração para outra, ficando a cargo do operador efetuar aquelas que se apresentem mais viáveis sob os aspectos operacionais.

Os resultados são apresentados para três sistemas hipotéticos amplamente divulgados na literatura e para um sistema real. Devido ao tratamento heurístico empregado para a solução do problema, não se pode garantir que as propostas de solução são ótimas, uma vez que não é realizada uma busca exaustiva verificando-se todas as opções possíveis de chaveamento. Entretanto, para os sistemas hipotéticos testados foram obtidos os mesmos resultados apresentados nas referências bibliográficas revisadas, mostrando que o algoritmo tem um bom desempenho. E com os resultados apresentados para o sistema real após a inclusão da subrotina de refinamento, pode-se afirmar que o algoritmo é também muito eficiente para resolver o problema de reconfiguração em sistemas reais.

Após a inclusão da subrotina de refinamento as melhores configurações encontradas para os três sistemas hipotéticos são exatamente as mesmas, mas para os sistema real de 32 barras foi obtido um conjunto de configurações diferentes. Ainda que não haja muita diferença nas perdas das melhores configurações e também na topologia das mesmas, reforçando a justificativa do bom funcionamento da metodologia desenvolvida e implementada.

No que diz respeito ao limites de queda de tensão utilizados na técnica de corte de configurações, estes foram obtidos por meio de testes com o programa adotando um valor que não reduzisse o espaço de busca de modo a comprometer a qualidade das soluções e não permitisse um aumento excessivo no número de configurações tornando a busca inviável pelo esforço computacional.



O algoritmo de busca mostra-se muito eficiente para encontrar as configurações radiais podendo ser afirmado que se não fosse o problema da explosão combinatorial, ele seria capaz de encontrar todas as configurações radiais possíveis para qualquer sistema. Isto significa que esse algoritmo pode ser usado em outras metodologias para resolver o problema de reconfiguração para guiar a busca. Sua eficiência fica ainda mais notável quando aplicado ao sistema real que tem 21 chaves de interconexão, não para encontrar o máximo de configurações possíveis, mas agora para guiar de maneira correta a busca. Para este sistema, a necessidade de uma técnica eficiente de poda na árvore de configurações é essencial para a aplicação do algoritmo. Pois, considerando que passe pelo critério de corte, apenas uma configuração em cada nível da árvore de decisão, o número de configurações que deveriam ser analisadas seria de 2^{21} e tornaria impraticável a busca.

A metodologia desenvolvida neste trabalho é adequada para implementação em máquinas de memória distribuída, permitindo expandir o espaço de busca e ao mesmo tempo resolver o problema de reconfiguração em um tempo menor.

Como continuidade do trabalho visando tornar o algoritmo proposto mais realístico propõe-se analisar a possibilidade de incorporar ao mesmo os seguintes aspectos:

- verificar a coordenação da proteção para cada configuração encontrada durante a busca, incluindo esta verificação como critério de corte;
- estudar as curvas de demandas de carga para programar a reconfiguração para diferentes horários do dia.
- estudar outros métodos para cálculo de fluxo de carga existentes na literatura e/ou novas propostas, verificando a eficiência dos mesmos no algoritmo implementado para a solução do problema de reconfiguração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Civanlar, S. et al. "Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction", **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 3, No.3, July 1988.
- [2] Baran, M. E. & Wu, F. F. "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing", **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 4, No.2, April 1989.
- [3] Gallego, R. A. & Monticelli, A. & Romero, R. "Um Método Aproximado de Otimização Usado na Reconfiguração de Redes de Distribuição, **In: Anais do XI Congresso Chileno de Ingenieria Electrica, Punta Arenas**, Novembro de 1995, pág. A 056 - A 091.
- [4] Morelato, A. L. & Monticelli, A. "Heuristic Search Approach to Distribution Systems Restoration", **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 4, nº 4, October 1989.
- [5] Taleski, R. & Rajicic, D. "Distribution Network Reconfiguration for Energy Loss Reduction", Paper nº. 96WM305-3 PWRS apresentado ao **IEEE/PES 1996 Winter Meeting**, Baltimore, MD, January 21-25, 1996.

- [6] Shirmohammadi, D. & Hong, H. W. "Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction", **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 4, No.2, April 1989.
- [7] Borozan, V. & Rajicic, D. & Ackovski, R. "Improved Method for Loss Minimization in Distribution Networks", **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 10, No.3, August 1995.
- [8] Goswami, S.K. & Basu, S.K. "A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization", **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 7, No.3, July 1992.
- [9] Glamocanin, V. "Optimal Loss Reduction of Distribution Networks", **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 5, No.3, August 1990.
- [10] Fan, J.Y. & Zhang, L. & McDonald, J.D. "Distribution Network Reconfiguration: Single Loop Optimization", **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 11, No.3, August 1996.
- [11] Sárfi, R.J. & Salama, M.M.A. & Chikhani, A.Y. "Distribution System Reconfiguration for Loss Reduction: An Algorithm Based on Network Partitioning Theory", **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 11, No.1, February 1996.
- [12] Cespedes, G. Renato. "New Method for the Analysis of Distribution Networks", **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 5, No.1, January 1990.
- [13] Baran, M. E. & Wu, F. F. "Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems", **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 4, No.1, January 1989.

- [14]Chiang, H.D. & Jean-Jumeau, R.M. "Optimal Network Reconfigurations in Distribution Systems: Part 2: Solution Algorithms and Numerical Results", **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 5, No.3, July 1990.
- [15]Merlin, A. & Back, H. "Search for a minimum loss optimal spanning tree configuration for an urban power distribution system", **Proceedings of 5th Power System Computation Conference**, Cambridge, U.K., September 1975.
- [16]Kuo, Cheng-Chien & Chang, Hong-Chan. "Applying a Refined Genetic Algorithm to Network Reconfiguration for Loss Reduction", **IEE of Japan Power & Energy '94**.
- [17]Nara, K. & Shiose, A. & Kitagawa, M. & Ishihara, T. "Implementation of Genetic Algorithm for Distribution Systems Loss Minimum Re-Configuration", **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 7, No.3, August 1992.
- [18]Bazaraa, M. S. & Jarvis, J. J. & Sherali, H. D. **Linear Programming and Network Flows**, John Wiley & Sons, Second Edition.
- [19]Bazaraa, M. S. & Sherali, H. D. & Shetty, C. M. **Nonlinear Programming - Theory and Algorithms**, John Wiley & Sons, Second Edition.
- [20]Nenhauser, G. L. & Wolsey, L. A. **Integer and Combinatorial Otimization**, New York: John Wiley & Sons, 1988.
- [21]Monticelli, A. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**, Editora Edgard Blucher Ltda, 1983.
- [22]Brown, H. E. **Grandes Sistemas Elétricos – Métodos Matriciais**, LTC/EFEL, 1983.



APÊNDICE A

Sistemas Testados

Este apêndice apresenta os dados dos três sistemas hipotéticos e do sistema real utilizados nos testes realizados com o método implementado para a resolução do problema de reconfiguração em sistemas de distribuição de energia elétrica. A topologia dos sistemas pode ser observada na figura A.1, A.2, A.3 e A.4 em que as linha contínuas que ligam as barras representam as chaves normalmente fechadas e as linhas pontilhadas representam as chaves de interconexão ou as chaves normalmente abertas. As chaves são determinadas pelo nó inicial (noi) e pelo nó final (nof) e a carga é dada por P e Q no nó final de cada chave.

A.1. Dados Completos do Sistema de 14 Barras

O sistema hipotético de 14 barras tem 3 chaves de interconexão, tensão base de 23 KV, potência base de 100 MVA. Seus dados foram obtidos da referência [1]. Abaixo está a topologia do sistema e a seguir os dados completos.

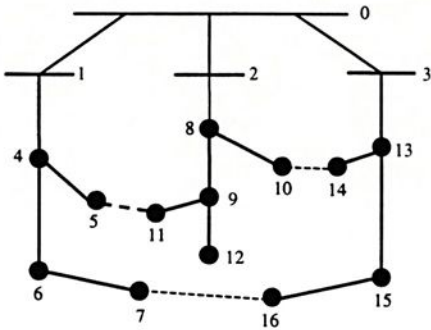


Figura A.1 - Diagrama unifilar do sistema de distribuição de 14 barras.

Nº. da Chave	Noi	Nof	R (Ohm)	X (Ohm)	P (KW)	Q (KVAr)
11	1	4	.39675	.52900	2000.000	-1600.000
12	4	5	.42320	.58190	3000.000	-400.000
13	4	6	.47610	.95220	2000.000	400.000
14	6	7	2.11600	2.11600	1500.000	-1200.000
16	2	8	.58190	.58190	4000.000	-2700.000
17	8	9	.42320	.58190	5000.000	-1800.000
18	8	10	.58190	.58190	1000.000	-900.000
19	9	11	.58190	.58190	600.000	500.000
20	9	12	.42320	.58190	4500.000	1700.000
22	3	13	.58190	.58190	1000.000	-900.000
24	13	14	.47610	.68430	1000.000	1100.000
23	13	15	.42320	.58190	1000.000	-900.000
25	15	16	2.11600	2.11600	2100.000	800.000
15	5	11	2.11600	2.11600		
21	10	14	2.11600	2.11600		
26	7	16	.47610	.68430		

A.2. Dados Completos do Sistema de 32 Barras

O sistema hipotético de 32 barras tem 5 chaves de interconexão, tensão base de 12,66 KV, potência base de 10 MVA. Seus dados foram obtidos da referência [8]. Abaixo está a topologia do sistema e a seguir os dados completos.

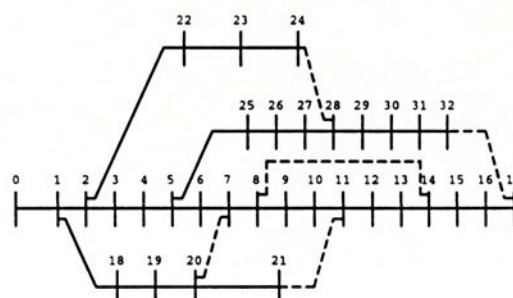


Figura A.2 - Diagrama unifilar do sistema de distribuição de 32 barras.

Nº. da Chave	Noi	Nof	R (Ohm)	X (Ohm)	P (KW)	Q (KVAr)
1	0	1	.09220	.04700	100.000	60.000
2	1	2	.49300	.25110	90.000	40.000
3	2	3	.36600	.18640	120.000	80.000
4	3	4	.38110	.19410	60.000	30.000
5	4	5	.81900	.70700	60.000	20.000
6	5	6	.18720	.61880	200.000	100.000
7	6	7	.71140	.23510	200.000	100.000
8	7	8	1.03000	.74000	60.000	20.000
9	8	9	1.04400	.74000	60.000	20.000
10	9	10	.19660	.06500	45.000	30.000
11	10	11	.37440	.12380	60.000	35.000
12	11	12	1.46800	1.15500	60.000	35.000
13	12	13	.54160	.71290	120.000	80.000
14	13	14	.59100	.52600	60.000	10.000
15	14	15	.74630	.54500	60.000	20.000
16	15	16	1.28900	1.72100	60.000	20.000
17	16	17	.73200	.57400	90.000	40.000
18	1	18	.16400	.15650	90.000	40.000

19	18	19	1.50420	1.35540	90.000	40.000
20	19	20	.40950	.47840	90.000	40.000
21	20	21	.70890	.93730	90.000	40.000
22	2	22	.45120	.30830	90.000	50.000
23	22	23	.89800	.70910	420.000	200.000
24	23	24	.89600	.70110	420.000	200.000
25	5	25	.20300	.10340	60.000	25.000
26	25	26	.28420	.14470	60.000	25.000
27	26	27	1.05900	.93370	60.000	20.000
28	27	28	.80420	.70060	120.000	70.000
29	28	29	.50750	.25850	200.000	600.000
30	29	30	.97440	.96300	150.000	70.000
31	30	31	.31050	.36190	210.000	100.000
32	31	32	.34100	.53020	60.000	40.000
33	7	20	.12479	.12479		
34	8	14	.12479	.12479		
35	11	21	.12479	.12479		
36	17	32	.03120	.03120		
37	24	28	.03120	.03120		



A.3. Dados Completos do Sistema de 69 Barras

O sistema hipotético de 69 barras tem 5 chaves de interconexão, tensão base de 12,66 KV, potência base de 100 MVA. Seus dados foram obtidos da referência [14]. Abaixo está a topologia do sistema e a seguir os dados completos.

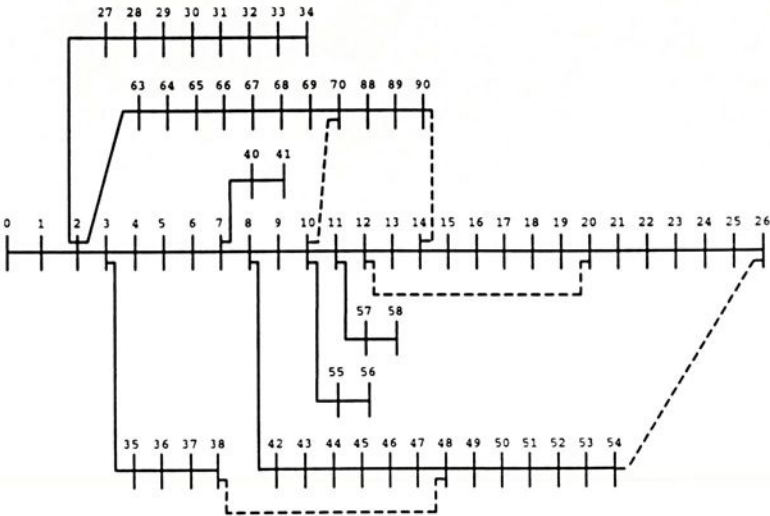


Figura A.3 - Diagrama unifilar do sistema de distribuição de 69 barras.

Nº. da Chave	Noi	Nof	R (Pu)	X (Pu)	P (KW)	Q (KVAr)
1	0	1	.00050	.00120	.000	.000
2	1	2	.00050	.00120	.000	.000
4	2	3	.00150	.00360	.000	.000
5	3	4	.02510	.02940	.000	.000
6	4	5	.36600	.18640	.878	.720
7	5	6	.38110	.19410	13.455	9.982
8	6	7	.09220	.04700	24.887	17.810
9	7	8	.04930	.02510	10.000	7.208
10	8	9	.81900	.27070	9.333	6.666
11	9	10	.18720	.06190	48.500	34.609
12	10	11	.71140	.23510	48.500	34.609
13	11	12	1.03000	.34000	2.710	1.821
14	12	13	1.04400	.34500	2.710	1.821

15	13	14	1.05800	.34960	.000	.000
16	14	15	.19660	.06500	15.176	10.198
17	15	16	.37440	.12380	16.500	11.775
18	16	17	.00470	.00160	16.500	11.775
19	17	18	.32760	.10830	.000	.000
20	18	19	.21060	.06960	.316	.212
21	19	20	.34160	.11290	37.983	27.100
22	20	21	.01400	.00460	1.762	1.184
23	21	22	.15910	.05260	.000	.000
24	22	23	.34630	.11450	9.390	6.670
25	23	24	.74880	.24750	.000	.000
26	24	25	.30890	.10210	4.667	3.330
27	25	26	.17320	.05720	4.667	3.330
28	2	27	.00440	.01080	8.667	6.185
29	27	28	.06400	.15650	8.667	6.185
30	28	29	.39780	.13150	.000	.000
31	29	30	.07020	.02320	.000	.000
32	30	31	.35100	.11600	.000	.000
33	31	32	.83900	.28160	4.582	3.260
34	32	33	1.70800	.56460	6.501	4.549
35	33	34	1.47400	.48730	1.920	1.290
36	2	63	.00440	.01080	8.667	6.185
37	63	64	.06400	.15650	8.667	6.185
38	64	65	.10530	.12300	.000	.000
39	65	66	.03040	.03550	8.000	5.709
40	66	67	.00180	.00210	8.000	5.709
41	67	68	.72830	.85090	.392	.325
42	68	69	.31000	.36230	.000	.000
43	69	70	.04100	.04780	2.000	1.427
44	70	88	.00920	.01160	.000	.000
45	88	89	.10890	.13730	3.076	8.787
46	89	90	.00090	.00120	3.076	8.787
47	3	35	.00340	.00840	.000	.000



48	35	36	.08510	.20830	26.350	18.800
49	36	37	.28980	.70910	28.226	91.492
50	37	38	.08220	.20110	128.226	91.492
51	7	40	.09280	.04730	13.512	9.442
52	40	41	.33190	.11140	1.202	.894
53	8	42	.17400	.08860	1.449	1.162
54	42	43	.20300	.10340	8.787	6.322
55	43	44	.28420	.14470	8.000	5.708
56	44	45	.28130	.14330	.000	.000
57	45	46	1.59000	.53370	.000	.000
58	46	47	.78370	.26300	.000	.000
59	47	48	.30420	.10060	.667	24.025
60	48	49	.38610	.11720	.000	.000
61	49	50	.50750	.25850	414.667	295.910
62	50	51	.09740	.04960	10.667	7.612
63	51	52	.14500	.07380	.000	.000
64	52	53	.71050	.36190	75.670	53.873
65	53	54	1.04100	.53020	19.670	13.912
66	10	55	.20120	.06110	6.000	4.282
67	55	56	.00470	.00140	6.000	4.282
68	11	57	.73940	.24440	9.333	6.660
69	57	58	.00470	.00160	9.333	6.660
70	10	70	.50000	.50000		
71	12	20	.50000	.50000		
72	14	90	1.00000	1.00000		
73	38	48	2.00000	2.00000		
74	26	54	1.00000	1.00000		



A.4. Dados Completos do Sistema de 135 Barras

O sistema real da cidade de Três Lagoas – Sistema CESP de 135 barras tem 21 chaves de interconexão, tensão base de 13,8 KV, potência base de 100 MVA. Abaixo está a topologia do sistema e a seguir os dados completos.

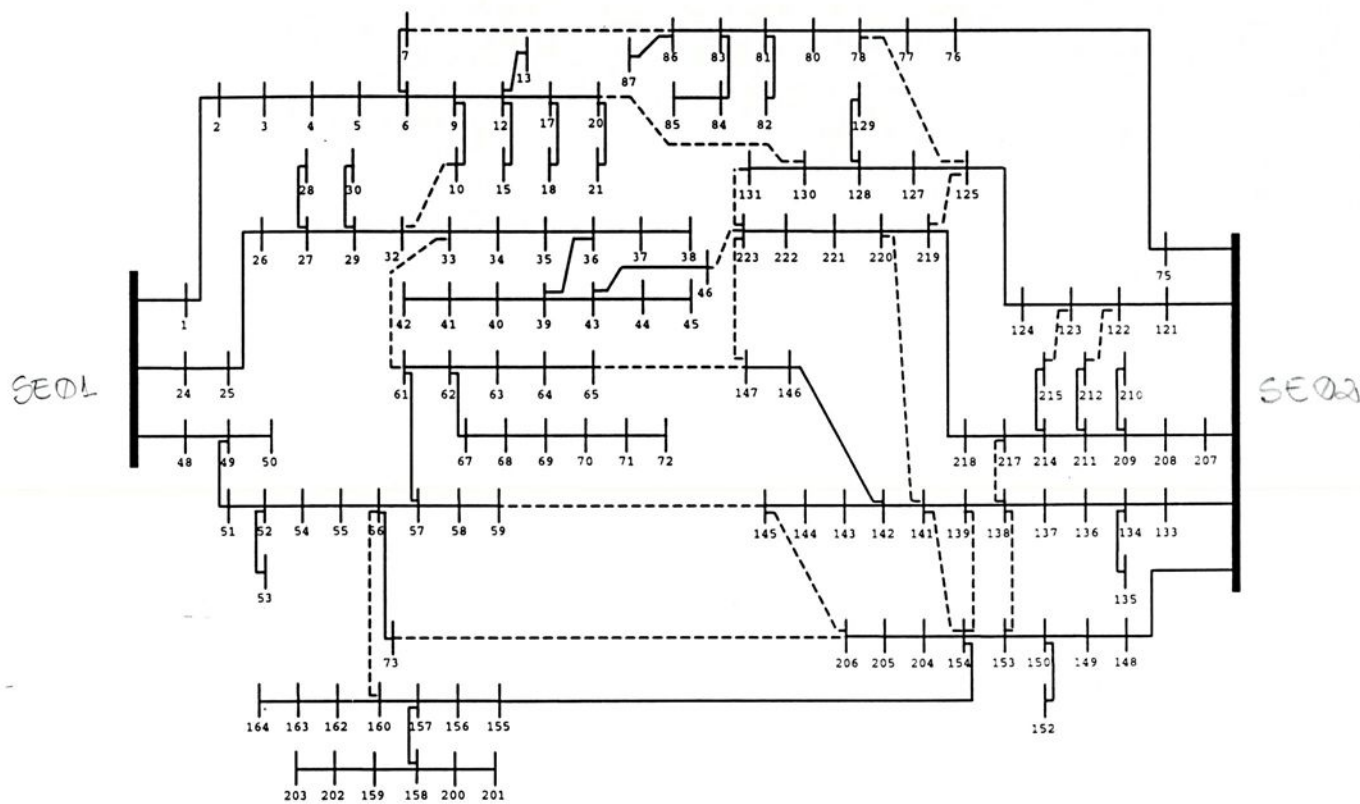


Figura A.4 - Diagrama unifilar do sistema de distribuição de 135 barras.

Nº. da Chave	Noi	Nof	R (Ohm)	X (Ohm)	P (KW)	Q (KVAr)
1	0	1	.33205	.76653	.000	.000
2	1	2	.00188	.00433	47.780	19.009
3	2	3	.22324	.51535	42.551	16.929
4	3	4	.09943	.22953	87.022	34.622
5	4	5	.15571	.35945	311.310	123.855
6	5	6	.16321	.37677	148.869	59.228
7	6	7	.11444	.26417	238.672	94.956

8	6	9	.05675	.05666	62.299	24.786
9	9	10	.52124	.27418	124.598	49.571
10	9	12	.10877	.10860	140.175	55.768
11	12	13	.39803	.20937	116.813	46.474
12	12	15	.91744	.31469	249.203	99.145
13	12	17	.11823	.11805	291.447	115.952
14	17	18	.50228	.26421	303.720	120.835
15	17	20	.05675	.05666	215.396	85.695
16	20	21	.29379	.15454	198.586	79.007
17	0	24	.33205	.76653	.000	.000
18	24	25	.00188	.00433	.000	.000
19	25	26	.22324	.51535	.000	.000
20	26	27	.10881	.25118	30.127	14.729
21	27	28	.71078	.37388	230.972	112.920
22	27	29	.18197	.42008	60.256	29.458
23	29	30	.30326	.15952	230.972	112.920
24	29	32	.02439	.05630	120.507	58.915
25	32	33	.04502	.10394	.000	.000
26	33	34	.01876	.04331	56.981	27.857
27	34	35	.11823	.11805	364.665	178.281
28	35	36	.02365	.02361	.000	.000
29	36	37	.18954	.09970	124.647	60.939
30	37	38	.39803	.20937	56.981	27.857
31	36	39	.05675	.05666	.000	.000
32	39	40	.09477	.04985	85.473	41.787
33	40	41	.41699	.21934	.000	.000
34	41	42	.11372	.05982	396.735	193.960
35	39	43	.07566	.07555	.000	.000
36	43	44	.36960	.19442	181.152	88.563
37	44	45	.26536	.13958	242.172	118.395
38	43	46	.05675	.05666	75.316	36.821
39	0	48	.33205	.76653	.000	.000
40	48	49	.11819	.27283	1.254	.531
41	49	50	2.96288	1.01628	6.274	2.660



42	49	51	.00188	.00433	.000	.000
43	51	52	.06941	.16024	117.880	49.971
44	52	53	.81502	.42872	62.668	26.566
45	52	54	.06378	.14724	172.285	73.034
46	54	55	.13132	.30315	458.556	194.388
47	55	56	.06191	.14291	262.962	111.473
48	56	57	.11444	.26417	235.761	99.942
49	57	58	.28374	.28331	.000	.000
50	58	59	.28374	.28331	109.215	46.298
51	57	61	.04502	.10394	.000	.000
52	61	62	.02626	.06063	72.809	30.865
53	62	63	.06003	.13858	258.473	109.570
54	63	64	.03002	.06929	69.169	29.322
55	64	65	.02064	.04764	21.843	9.260
56	62	67	.10881	.25118	.000	.000
57	67	68	.25588	.13460	20.527	8.702
58	68	69	.41699	.21934	150.548	63.819
59	69	70	.50228	.26421	220.687	93.552
60	70	71	.33170	.17448	92.384	39.163
61	71	72	.20849	.10967	.000	.000
62	56	73	.13882	.32047	226.693	96.098
63	0	75	.00750	.01732	.000	.000
64	75	76	.27014	.62362	294.016	116.974
65	76	77	.38270	.88346	83.015	33.028
66	77	78	.33018	.76220	83.015	33.028
67	78	80	.32830	.75787	103.770	41.285
68	80	81	.17072	.39409	176.408	70.184
69	81	82	.55914	.29412	83.015	33.028
70	81	83	.05816	.13425	217.917	86.698
71	83	84	.70130	.36890	23.294	9.267
72	84	85	1.02352	.53839	5.075	2.019
73	83	86	.06754	.15591	72.638	28.899
74	86	87	1.32352	.45397	405.990	161.523
75	0	121	.01126	.02598	.000	.000

76	121	122	.72976	1.68464	100.182	42.468
77	122	123	.22512	.51968	142.523	60.417
78	123	124	.20824	.48071	96.042	40.713
79	124	125	.04690	.10827	300.454	127.366
80	125	127	.61950	.61857	141.238	59.873
81	127	128	.34049	.33998	279.847	118.631
82	128	129	.56862	.29911	87.312	37.013
83	128	130	.10877	.10860	243.849	103.371
84	130	131	.56862	.29911	247.750	105.025
85	0	133	.01126	.02598	.000	.000
86	133	134	.41835	.96575	89.878	38.101
87	134	135	.10499	.13641	1137.280	482.108
88	134	136	.43898	1.01338	458.339	194.296
89	136	137	.07520	.02579	385.197	163.290
90	137	138	.07692	.17756	.000	.000
91	138	139	.33205	.76653	79.608	33.747
92	139	141	.08442	.19488	87.312	37.013
93	141	142	.13320	.30748	.000	.000
94	142	143	.29320	.29276	74.001	31.370
95	143	144	.21753	.21721	232.050	98.369
96	144	145	.26482	.26443	141.819	60.119
97	142	146	.10318	.23819	.000	.000
98	146	147	.13507	.31181	76.449	32.408
99	0	148	.00938	.02165	.000	.000
100	148	149	.16884	.38976	51.322	21.756
101	149	150	.11819	.27283	59.874	25.381
102	150	152	2.28608	.78414	9.065	3.843
103	150	153	.45587	1.05236	2.092	.887
104	153	154	.69600	1.60669	16.735	7.094
105	154	155	.45774	1.05669	1506.522	638.634
106	155	156	.20298	.26373	313.023	132.694
107	156	157	.21348	.27737	79.831	33.842
108	157	158	.54967	.28914	51.322	21.756
109	158	159	.54019	.28415	.000	.000



110	157	160	.04550	.05911	202.435	85.815
111	160	162	.47385	.24926	60.823	25.784
112	162	163	.86241	.45364	45.618	19.338
113	163	164	.56862	.29911	.000	.000
114	158	200	.77711	.40878	157.070	66.584
115	200	201	1.08038	.56830	.000	.000
116	159	202	1.09933	.57827	250.148	106.041
117	202	203	.47385	.24926	.000	.000
118	154	204	.32267	.74488	69.809	29.593
119	204	205	.14633	.33779	32.072	13.596
120	205	206	.12382	.28583	61.084	25.894
121	0	207	.01126	.02598	.000	.000
122	207	208	.64910	1.49842	94.622	46.260
123	208	209	.04502	.10394	49.858	24.375
124	209	210	.52640	.18056	123.164	60.214
125	209	211	.02064	.04764	78.350	38.304
126	211	212	.53071	.27917	145.475	71.121
127	211	214	.09755	.22520	21.369	10.447
128	214	215	.11819	.27283	74.789	36.564
129	214	217	.13882	.32047	227.926	111.431
130	217	218	.04315	.09961	35.614	17.411
131	218	219	.09192	.21220	249.295	121.877
132	219	220	.16134	.37244	316.722	154.842
133	220	221	.37832	.37775	333.817	163.199
134	221	222	.39724	.39664	249.295	121.877
135	222	223	.29320	.29276	.000	.000
136	7	86	.13132	.30315		
137	10	32	.26536	.13958		
138	20	130	.14187	.14166		
139	46	223	.08512	.08499		
140	33	61	.04502	.10394		
141	59	145	.14187	.14166		
142	65	147	.14187	.14166		
143	73	206	.03940	.09094		



144	78	125	.12944	.29882
145	125	219	.01688	.03898
146	131	223	.33170	.17448
147	139	154	.14187	.14166
148	138	217	.07692	.17756
149	138	153	.07692	.17756
150	141	154	.07692	.17756
151	141	220	.07692	.17756
152	145	206	.26482	.26443
153	160	56	.49696	.64567
154	212	122	.17059	.08973
155	215	123	.05253	.12126
156	223	147	.29320	.29276



APÊNDICE B

Artigos Publicados

Este apêndice apresenta os artigos publicados em dois congressos referentes ao trabalho desenvolvido pelo aluno durante o curso de pós-graduação.

B.1. Artigo 01

RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO

F. Casari

J. R. S. Mantovani

R. Romero

Departamento de Engenharia Elétrica
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - FEIS/UNESP
email: casari@feis.unesp.br
Av. Brasil, 56 - CEP.: 15385-000
Ilha Solteira - SP
Brasil

XII Congresso Chileno de Engenharia Elétrica

Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade de La Frontera
Temuco - Chile



RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO

F. Casari J. R. S. Mantovani R. Romero

Departamento de Engenharia Elétrica
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - FEIS/UNESP
email: casari@feis.unesp.br
Av. Brasil, 56 - CEP.: 15385-000
Ilha Solteira - SP
Brasil

RESUMO

A reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica é realizada através da abertura/fechamento de chaves de interconexão, mantendo-se a topologia radial dos alimentadores, para minimização de perdas e balanceamento de carga. No presente artigo é apresentado um algoritmo heurístico que realiza a reconfiguração de redes de distribuição para planejamento da operação com vistas a obter um conjunto de configurações que apresentem as menores perdas ativas nos alimentadores. Para obter as configurações de menores perdas utiliza-se um método aproximado de cálculo de fluxo de potência radial e um procedimento heurístico baseado no limite máximo de queda de tensão nos alimentadores. Apresentam-se resultados para dois sistemas amplamente divulgados na literatura.

Palavras chave: reconfiguração, minimização de perdas, planejamento da operação.

ABSTRACT

Network reconfiguration in distribution can be carried out by changing the open/closed states of the sectionalizing and tie switches, and is done for loss minimization or for load balancing. In this paper it is presented a heuristic algorithm that realize network reconfiguration as planning operation in order to get a configuration set that present active losses which are smaller in the feeders. To aid the search, an approximate power flow method and a heuristic process are used. The heuristic process is based on maximum limit of voltage drop. The results are presented for two systems very known in the specialized literature.

Keywords: reconfiguration, loss minimization, planning operation.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de distribuição de energia elétrica são na grande maioria, configurados radialmente, com o propósito de facilitar fatores inerentes à proteção - coordenação, de modo a atenuar correntes de curto-circuito e diminuir custos com equipamentos. Em geral esses sistemas apresentam possibilidades de alteração da topologia da rede através da abertura/fechamento de chaves seccionadoras localizadas em pontos estratégicos. Essa alteração na topologia, mantendo-se a radialidade, é realizada com vistas a redução de 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 gerenciamento da operação (reconfiguração).

A reconfiguração de redes de distribuição pode ser usada como uma ferramenta de planejamento e/ou de controle em tempo real. A operação "on-line" requer respostas rápidas para que se possa tomar as devidas ações de controle no comando automático dos sistemas visando a restauração dos serviços pelo isolamento de zonas de fornecimento com defeitos do tipo curto-circuito ou mesmo um balanceamento de carga visando redução de perdas. Já no planejamento da operação o tempo de obtenção das respostas não assume um papel tão importante quanto no caso anterior. No planejamento buscam-se configurações com vistas a obter uma estratégia ótima de operação com minimização de perdas, atendimento da demanda diária com boa qualidade de serviço (perfil adequado das magnitudes de tensão, confiabilidade, etc.), além da redução dos custos de operação.

O problema da reconfiguração pode ser formulado como um problema de programação não-linear com variáveis inteiras, cuja solução exata envolve a seleção, entre todas as configurações possíveis, daquela que tenha a menor perda. Naturalmente, que a busca examinando-se todas as configurações possíveis dará a solução exata e isso seria computacionalmente fantástico se o número de possibilidades de configurações geradas pelo chaveamento não fosse um processo exaustivo para problemas de tamanho prático, pois o número de possibilidades de configurações cresce exponencialmente com o número de chaves e de acordo com suas disposições em um sistema de distribuição. Esse fato do crescimento excessivo do número de possibilidades é denominado explosão combinatorial.

Por causa da razão descrita acima algoritmos heurísticos aproximados têm sido sugeridos para estabelecer critérios que possam ser usados para eliminar opções indesejáveis de chaveamento no sentido de diminuir a dimensão do problema. Um algoritmo tipo "branch exchange" foi sugerido por Cinalvar et al [1] no qual foi desenvolvida uma simples fórmula com a capacidade de estimar com mínimo esforço computacional a mudança nas perdas, resultado da reconfiguração dos alimentadores, desenvolvendo assim um critério para reduzir o número de configurações candidatas. Um critério diferente foi utilizado por Baran & Wu [2] para determinar o ramo a ser trocado, seguindo a solução aproximada por [1], mas introduzindo dois diferentes métodos para um cálculo de fluxo de carga aproximado no sistema depois da troca de ramo, desenvolvendo dessa maneira um mecanismo de filtragem no sentido de minimizar a busca requerida para uma decisão de chaveamento. Merlin & Back [4] usaram uma técnica de otimização tipo "branch and bound" para

determinar a configuração de mínima perda. Neste método todas as chaves são inicialmente fechadas para formar uma rede fracamente malhada. As chaves são então abertas sucessivamente para restaurar a configuração radial. Shirmohammadi & Hong [3] baseados no método desenvolvido por [4] sugeriram um algoritmo heurístico, em que o processo de solução também parte com todas as chaves do sistema fechadas e depois são abertas uma a uma para estabelecer o fluxo ótimo da rede. Neste algoritmo foram sugeridas várias aproximações para o método proposto por [4].

Neste trabalho é apresentado um algoritmo heurístico de reconfiguração de redes de distribuição com vistas a redução de perdas no sistema de distribuição. A metodologia desenvolvida gera a partir de uma configuração radial inicial um conjunto de configurações mais atrativas e dentre as quais são escolhidas as melhores, ou seja, as que apresentam as menores perdas nos alimentadores.

2. MÉTODO PROPOSTO

O método proposto utiliza técnicas de “branch exchange” e “branch and bound” ao mesmo tempo. Isto ocorre pois é utilizada a troca de ramos para se encontrar novas configurações que por sua vez gerarão outras configurações ocorrendo uma expansão tipo árvore de “branch and bound”.

Um algoritmo para encontrar a solução ótima deveria realizar uma busca em todas as configurações radiais, e assim ficaria fácil encontrar entre todas as possibilidades, um conjunto das melhores ou apenas a melhor de todas. Entende-se por melhor configuração aquela que tem as menores perdas possíveis e satisfaça as restrições de operação. Notando a dimensão do problema, devido ao grande número de possibilidades de chaveamento em um sistema, e conseqüentemente o grande número de configurações possíveis, que aumenta de acordo com o aumento do número de chaves do sistema, foi incluído um método para podar o número de configurações a serem analisadas.

O método parte de uma configuração radial inicial, que é identificada por um conjunto de chaves fechadas e um outro conjunto de chaves abertas. Os chaveamentos são efetuados de maneira que as chaves abertas são fechadas uma de cada vez. A cada chaveamento surge um leque de novas configurações. Para cada uma das configurações do leque encontra-se o estado do sistema através de um fluxo de carga aproximado para sistemas de distribuição radiais. A partir da identificação do estado do sistema são descartadas as configurações que violam um limite de queda de tensão pré-definido. Esse limite é estabelecido para cada sistema. Na verdade o algoritmo trabalha com a densidade de carga por região do sistema e tenta-se demonstrar que a queda de tensão está diretamente relacionada com as perdas. Esta estratégia de poda procura sempre manter ativas as configurações mais promissoras, para que finalmente se possa encontrar não uma configuração ótima, mas sim, um conjunto de configurações com os menores valores de perdas possíveis, satisfazendo as restrições de operação.

Para determinar o perfil de tensão do sistema utilizou-se um método aproximado de cálculo de fluxo de carga que é processado após cada nova configuração ser gerada que é descrito logo abaixo.

Supondo que o alimentador de acordo com a Figura-2.1 tenha a tensão V_0 determinada e que as cargas concentradas nos pontos são dadas por $S_1, S_2, \dots, S_k$. As impedâncias de cada ramo é dada por $z_i = r_i + jx_i$.

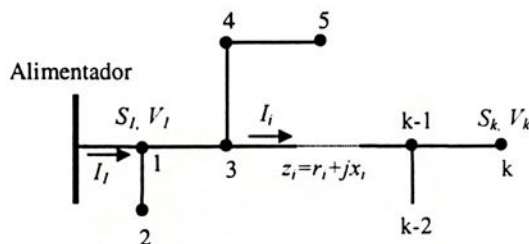


Figura 2.1 - Diagrama esquemático de alimentador radial

A corrente I_i no ramo i , é calculada concentrando-se toda a carga que está conectada ao nó i , direta ou indiretamente, caminhando-se em sentido contrário ao da subestação ou do alimentador. Para isso é feita uma busca na listagem dos ramos, onde é verificado se existem e quais são as ramificações no alimentador, o que torna a busca um pouco mais dificultosa. Por exemplo, para se calcular a corrente no ramo 1-3 da Figura- 2.1:

$$I_{1-3}^* = \frac{S_3 + S_4 + S_5 + \dots + S_{k-2} + S_{k-1} + S_k}{V_1} \quad (1)$$

Depois de calculada a corrente no ramo pode-se calcular a queda de tensão no ramo:

$$\Delta V_{1-3} = Z_{1-3} * I_{1-3} \quad (2)$$

Dessa maneira a tensão no nó 3 é calculada da seguinte maneira:

$$V_3 = V_1 - \Delta V_{1-3} \quad (3)$$

O processo de cálculo das tensões nos nós do sistema é feito de maneira iterativa de modo que para a primeira iteração, a tensão utilizada para o cálculo da corrente nos ramos do sistema pela eq. (1) é a tensão do nó que está do outro lado do ramo no sentido da subestação ou alimentador. Para as iterações subsequentes a tensão utilizada na eq. (1) é a própria tensão do nó que está se recalculando a tensão. O processo converge quando a diferença entre o módulo da tensão calculada na iteração n e $n-1$ for menor de que uma tolerância pré-especificada.

Dessa maneira, pode-se ter a tensão aproximada em cada nó e a corrente em cada ramo do sistema. Isto é feito para cada alimentador do sistema. Então toma-se a maior queda de tensão entre os alimentadores. Se tal queda estiver dentro dos limites determinados, a configuração será colocada na listagem de configurações. Listagem esta que será utilizada para ser realizada a seleção das melhores configurações e a perda na mesma é calculada. Caso contrário será descartada.

Como dito anteriormente, após ser processado o fluxo de potência radial tem-se a tensão em cada nó do sistema e a corrente em cada ramo. Com a corrente em cada ramo pode ser calculada a perda total do sistema:

$$Perda = \sum_{i=1}^n r_i * I_i^2 \quad (4)$$

As perdas de cada configuração também são armazenadas em um vetor paralelo ao das configurações para a escolha das melhores, posteriormente.

3. ALGORITMO IMPLEMENTADO

O algoritmo implementado identifica a partir de um conjunto de chaves fechadas e outro de chaves abertas a configuração inicial do sistema. A configuração inicial está no nível n_0 da árvore de configurações, e cada conjunto de configurações geradas com o fechamento de cada chave aberta forma um outro nível. Desse modo ao se fechar a primeira chave aberta formar-se-á o nível n_1 da árvore, com o conjunto de configurações que são geradas a partir das configurações do nível anterior, neste caso, apenas o nível n_0 . Quando se tratar da segunda chave aberta a ser fechada, serão tomadas todas as configurações dos níveis anteriores para serem chaveadas, isto é, as configurações dos níveis n_0 e n_1 , para gerar as configurações do nível n_2 . E assim é feito até que sejam tomadas para efetuar o chaveamento todas as chaves abertas da configuração inicial.

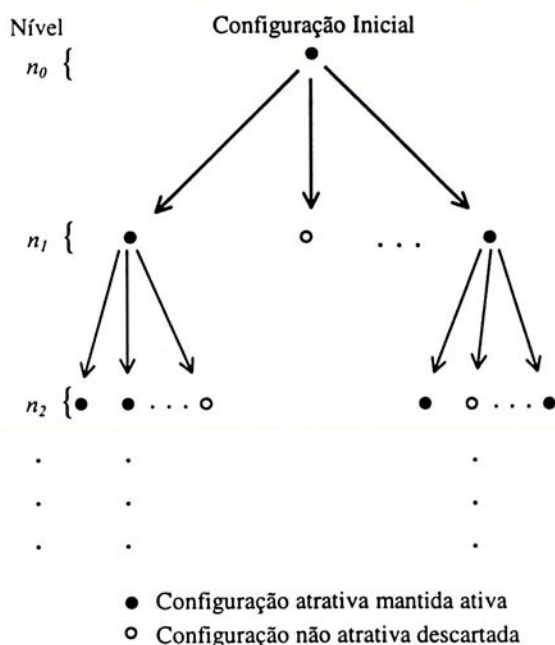


Figura 3.1 - Níveis da árvore de configurações

Na árvore de configurações o número de níveis será igual ao número de chaves de interconexão que existirem no sistema. Em cada nível existirão as configurações mais atrativas que permanecerão ativas e gerarão outras configurações nos níveis subsequentes, e também existirão as configurações que não são atrativas e que são descartadas logo ao serem encontradas.

Da mesma maneira que alguns autores desenvolveram um método de poda na árvore das configurações, procurou-se estabelecer um método que reduza o conjunto de configurações a serem examinadas. Esta estratégia de poda procura sempre manter ativas as configurações mais promissoras, para que finalmente se possa encontrar não uma configuração ótima, mas sim, um conjunto de configurações com os menores valores de perdas possíveis, satisfazendo as restrições de operação. Esse método de poda na árvore das configurações exclui as menos promissoras logo que são encontradas.

Seguindo esta metodologia e utilizando o método descrito anteriormente para se obter o perfil de tensão do sistema, foi implementado um esquema que exclui as configurações que ex-

cedem um certo limite de queda de tensão. Esse limite de queda de tensão deve ser definido para cada sistema, realizando-se testes para determiná-lo adequadamente.

Os passos seguidos pelo algoritmo estão descritos abaixo:

Passo (i) - Identificar a configuração inicial;

Passo (ii) - Fechar chave de interconexão inicialmente aberta;

Passo (iii) - Identificar nos níveis anteriores a configuração a ser chaveada.

Passo (iv) - Examinar as configurações geradas.

Para cada configuração gerada:

- verificar a sua singularidade;

- processar o fluxo de potência radial para a configuração;

- verificar o limite de queda de tensão para cada alimentador;

- se a maior queda de tensão da configuração está dentro do limite pré-determinado, adicionar a configuração encontrada na listagem do nível n_i e calcular a perda da mesma, caso contrário descartar;

Passo (v) - Foram tomadas todas as configurações encontradas nos níveis anteriores? Se sim ir ao *passo (vi)*, se não voltar ao *passo (iii)*;

Passo (vi) - Foram fechadas todas as chaves de interconexão inicialmente abertas? Se sim ir ao *passo (vii)*, se não voltar ao *passo (ii)*;

Passo (vii) - Escolher dentre as configurações encontradas um conjunto de tamanho também pré-determinado das melhores configurações, isto é, as que têm a menor perda.

Passo (viii) - Imprimir as melhores configurações encontradas com seus respectivos valores de perdas.

Como a queda de tensão está diretamente ligada às perdas do sistema, a poda do número de configurações está sendo realizada com base nesse valor de queda de tensão, ou seja, se uma configuração tem uma certa queda de tensão que está acima do limite determinado as configurações que se originarem daquela serão descartadas.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Foram realizados testes com 2 sistemas conhecidos na literatura especializada para a obtenção dos resultados. Os dois sistemas são hipotéticos. O primeiro sistema tem 14 barras, 3 chaves de interconexão, tensão 23 KV, potência base 100 MVA e seus dados completos são encontrados na referência [1]. O segundo sistema tem 69 barras, 5 chaves de interconexão, tensão 12.66 KV, potência base de 100 MVA e seus dados completos são encontrados na referência [6].

Para estes 2 sistemas comparou-se o método de fluxo de carga aproximado que foi utilizado no algoritmo implementado com um método iterativo tipo Newton desenvolvido para sistemas de alta tensão, e que apresenta uma boa precisão e segurança. Inicialmente calculou-se pelos dois métodos as perdas da configuração inicial de cada sistema testado. Depois de encontradas as melhores configurações calculou-se também pelos dois métodos as perdas para a melhor configuração encontrada de cada sistema testado. As chaves de interconexão para a configuração inicial do sistema de 14 barras são 15-21-26 e para a configuração ótima são 17-19-26. Para o sistema de 69 barras as chaves de interconexão são 70-71-72-73-74 para a configuração inicial e 15-57-62-70-71, 15-59-62-70-71 e 15-56-62-70-71 para as três configurações ótimas, pois apresentam a

mesma perda. A seguir são apresentados na Tabela-I os resultados da comparação dos dois métodos para os dois sistemas.

Tabela I: Perdas nas configurações inicial e ótima para os dois sistemas testados pelos métodos aproximado e de Newton.

Configuração/ sistema teste	Perdas em KW		Erro Percentual
	Mét. Aprox.	Mét. Newton	
inicial/14	529.61	547.72	3.31 %
ótima/14	496.25	510.76	2.84 %
inicial/69	20.44	20.87	2.06 %
ótima/69	9.28	9.43	1.59 %

Na Tabela-I, em que há a comparação entre as perdas obtidas pelo método aproximado implementado e por Newton, pode-se notar que a diferença percentual é pequena. Os dois sistemas são bem diferentes quanto às suas topologias e cargas. O sistema de 14 barras é pequeno e com grandes cargas enquanto que o sistema de 69 barras é grande com pequenas cargas e isto pôde testar a eficiência do método de fluxo de carga implementado, mostrando que tem uma boa eficiência.

Tabela II: Melhores configurações para sistema de 14 barras

Sistema de 14 barras	
Configuração	Perda (KW)
17-19-26	496.25
15-17-26	511.08
19-21-26	514.33
14-17-19	519.47
15-21-26	529.61

Como citado anteriormente, o algoritmo seleciona um conjunto com as melhores configurações, que no caso a título de teste foi selecionado um conjunto com as cinco melhores configurações encontradas para o sistema de 14 barras e um conjunto com dez para o sistema de 69 barras. O conjunto com as melhores configurações expressas por suas chaves de interconexão que estão abertas e suas respectivas perdas em KW calculadas pelo método aproximado implementado estão nas Tabelas II e III.

Tabela III: Melhores configurações para sistema de 69 barras

Sistema de 69 barras	
Configuração	Perda (KW)
15-57-62-70-71	9.2770
15-59-62-70-71	9.2770
15-56-62-70-71	9.2770
15-58-62-70-71	9.2770
14-59-62-70-71	9.2844
14-56-62-70-71	9.2844
14-57-62-70-71	9.2844
14-58-62-70-71	9.2844
13-57-62-70-71	9.2930
13-59-62-70-71	9.2930

No caso do sistema de 69 barras foram tomadas dez configurações por causa da diferença na perda de cada uma ser muito pequena.

Para os sistemas testados foram obtidos os mesmos resultados apresentados nas referências [5] e [6], mostrando que o algoritmo tem um bom desempenho.

CONCLUSÕES

Neste trabalho apresenta-se um algoritmo heurístico eficiente e robusto na resolução do problema da reconfiguração de redes radiais de sistemas de distribuição. Pela metodologia desenvolvida tem-se como resultado um conjunto de configurações com os menores valores de perdas. Estes valores de perdas, dependendo do sistema analisado, são muito próximos, mostrando que às vezes não há alterações significantes nos valores das perdas quando se passa de uma configuração para outra, ficando a cargo do operador efetuar aquelas que se apresentam mais viáveis sob os aspectos operacionais e de confiabilidade.

As configurações obtidas apresentam excelente qualidade, mas devido ao tratamento heurístico empregado para a solução do problema, não se pode garantir que são ótimas, uma vez que não é realizada uma busca exaustiva verificando-se todas as opções possíveis de chaveamento. Nos sistemas testados verificou-se que entre as melhores configurações obtidas estão também as obtidas por outros autores e relatadas na literatura.

Pesquisas estão sendo desenvolvidas, visando estudar e avaliar a abordagem de sistemas com desequilíbrio de carga: obtenção de heurísticas que permitam ordenar as chaves abertas/fechadas do sistema com vistas a um metodologia mais eficiente que permita passar de uma configuração radial a outra e técnica de poda eficiente na árvore de configurações.

REFERÊNCIAS

- [1] Civanlar, S. et al. "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, No.3, July 1988.
- [2] Baran, M. E. & Wu, F. F. "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No.2, April 1989.
- [3] Shirmohammadi, D. & Hong, H. W. "Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No.2, April 1989.
- [4] Merlin, A. & Back, H. "Search for a minimum loss optimal spanning tree configuration for an urban power distribution system", *Proceedings of 5th Power System Computation Conference, Cambridge, U.K., September 1975*.
- [5] Gallego, R. A. & Monticelli, A. & Romero, R. "Um método aproximado de otimização usado na reconfiguração de redes de distribuição", In: *Anais do XI Congresso Chileno de Ingeniería Eléctrica, Punta Arenas, Novembro de 1995*, pág. A 056 - A 091.
- [6] Chiang, H.D. & Jean-Jumeau, R.M. "Optimal Network Reconfigurations in Distribution Systems: Part 2: Solution Algorithms and Numerical Results", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No.3, July 1990.

- [7] Morelato, A. L. & Monticelli, A. "Heuristic search approach to distribution systems restoration", **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 4, No.4, October 1989.
- [8] Borozan, V. & Rajicic, D. & Ackovski, R. "Improved method for loss minimization in distribution networks", **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 10, No.3, August 1995.
- [9] Goswami, S.K. & Basu, S.K. "A new algorithm for the re-configuration of distribution feeders for loss minimization", **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 7, No.3, July 1992.
- [10] Glamocanin, V. "Optimal loss reduction of distribution networks", **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 5, No.3, August 1990.
- [11] Fan, J.Y. & Zhang, L. & McDonald, J.D. "Distribution network reconfiguration: single loop optimization", **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 11, No.3, August 1996.
- [12] Sárfi, R.J. & Salama, M.M.A. & Chikhani, A.Y. "Distribution system reconfiguration for loss reduction: an algorithm based on network partitioning theory", **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 11, No.1, February 1996.
- [13] Jiang, D. & Baldick, R. "Optimal electric distribution system switch reconfiguration and capacitor control", **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 11, No.2, May 1996.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo/FAPESP, através do processo 96/2002-3.

BIOGRAFIAS

FERNANDO CASARI

Engenheiro Eletricista em 1995 pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul UFMS/Campo Grande, atualmente é aluno de Pós-Graduação a nível de Mestrado pela Universidade Estadual Paulista/UNESP/Ilha Solteira. Sua área de interesse é análise e planejamento de sistemas de energia elétrica.

JOSÉ R. S. MANTOVANI

Professor Assistente Doutor da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista/UNESP. Engenheiro Eletricista em 1981 pela UNESP/Ilha Solteira, Mestre em 1987 e Doutor em 1995 em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP. Sua área de interesse é análise e planejamento de sistemas de energia elétrica.

RUBÉN ROMERO

Professor Assistente Doutor da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista/UNESP. B.Sc e P.E. em Engenharia Elétrica em 1978 e 1984 pela Universidad Nacional de Ingenieria/UNI, Lima - Peru; Mestre em 1990 e Doutor em 1993 em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP. Sua área de interesse é análise e planejamento de sistemas de energia elétrica.



B.2. Artigo 02

RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO

FERNANDO CASARI, JOSÉ R. S. MANTOVANI, RUBÉN A. ROMERO

*Departamento de Engenharia Elétrica
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - FEIS/UNESP
Av. Brasil, 56, 15385-000 Ilha Solteira, SP, BRASIL
E-mail: mant@dee.feis.unesp.br*

**XII Congresso Brasileiro de Automática
(XII CBA)**

**Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
Uberlândia – SP - Brasil**



RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO

FERNANDO CASARI, JOSÉ R. S. MANTOVANI, RUBÉN A. ROMERO

*Departamento de Engenharia Elétrica
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - FEIS/UNESP
Av. Brasil, 56, 15385-000 Ilha Solteira, SP, BRASIL
E-mail: mant@dee.feis.unesp.br*

Resumo — A reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica é realizada através da abertura/fechamento de chaves de interconexão, mantendo-se a topologia radial dos alimentadores, para minimização de perdas e balanceamento de carga. No presente artigo é apresentado um algoritmo heurístico que realiza a reconfiguração de redes de distribuição para planejamento da operação com vistas a obter um conjunto de configurações que apresentem as menores perdas ativas nos alimentadores. Para obter as configurações de menores perdas utiliza-se um método aproximado de cálculo de fluxo de potência radial e um procedimento heurístico baseado no limite máximo de queda de tensão nos alimentadores. São apresentados resultados para três sistemas hipotéticos amplamente divulgados na literatura.

Abstract — Network reconfiguration in distribution systems can be carried out by changing the status of sectionalizing switches and it is usually done for loss minimization and load balancing. In this paper it is presented an heuristic algorithm that accomplishes network reconfiguration for operation planning in order to obtain a configuration set whose configurations have the smallest active losses on its feeders. To obtain the configurations, it is used an approached radial load flow method and a heuristic proceeding based on maximum limit of voltage drop on feeders. Results are presented for three hypothetical systems largely known whose data are available in literature.

Keywords — distribution systems; reconfiguration; loss minimization; planning operation; heuristic algorithm.

1 Introdução

Os sistemas aéreos de distribuição de energia elétrica são na grande maioria configurados radialmente, 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, através da abertura/fechamento de chaves seccionadoras localizadas em pontos estratégicos. A alteração da topologia, mantendo-se a radialidade, é realizada de modo a 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 da configuração).

A reconfiguração de redes de distribuição pode ser usada como uma ferramenta de planejamento e/ou de controle em tempo real da operação do sistema. A operação "on-line" requer respostas rápidas para que possam ser tomadas as devidas ações de controle no comando automático dos sistemas visando a restauração dos serviços pelo isolamento de zonas de fornecimento com defeitos do tipo curto-circuito ou mesmo um balanceamento de carga visando redução de perdas. Já no planejamento da operação o tempo de obtenção das respostas não assume um papel tão importante quanto no caso anterior. No planejamento da operação buscam-se configurações com vistas a obter uma estratégia ótima de operação com minimização de perdas, atendimento da demanda diária com boa qualidade de serviço (perfil adequado da magnitude

das tensões, confiabilidade, etc.), além da redução dos custos de operação.

Em geral pode-se dizer que problema da reconfiguração de redes de distribuição consiste em se buscar uma estratégia ótima de operação de modo a minimizar as perdas nos alimentadores e propiciar um balanceamento adequado das cargas no sistema trifásico, considerando-se aspectos de confiabilidade da proteção e da qualidade de fornecimento de energia aos consumidores. Na literatura são encontradas duas abordagens para o problema de reconfiguração de redes de distribuição:

1. Utilização de técnicas de buscas baseadas em heurísticas;
2. Utilização de técnicas de otimização, onde inicialmente considera-se o sistema malhado, adotando-se a condição que todas as chaves seccionadoras estão fechadas. As chaves são abertas sucessivamente para se obter a configuração radial. A técnica de otimização normalmente empregada para resolver o problema, são algoritmos do tipo "branch-and-bound".

A solução exata para o problema da reconfiguração envolve a seleção, entre todas as configurações possíveis, daquela que tenha a menor perda. Naturalmente que a busca examinando-se todas as configurações possíveis dará a solução exata do problema. Mas isso é impossível, pois o número de configurações factíveis geradas pelo chaveamento cresce exponencialmente com o número e a disposição das chaves no sistema, tornando o processo de busca exaustivo para sistemas reais. O fato do crescimento exponencial do número de possibilidades é denominado explosão combinatorial.

Por causa da razão descrita acima algoritmos heurísticos aproximados têm sido sugeridos para resolver o problema de reconfiguração, não garantindo a otimalidade da solução encontrada, mas apenas que a solução seja boa ou quase ótima. Os algoritmos heurísticos procuram estabelecer critérios que possam ser usados para eliminar opções indesejáveis de chaveamento no sentido de diminuir a dimensão do problema. Cinvalar et al. (1988) sugerem um algoritmo no qual foi proposta uma fórmula simples com capacidade de estimar com reduzido esforço computacional a mudança nas perdas, resultado da troca de ramos para efetuar a reconfiguração dos alimentadores, desenvolvendo assim um critério para reduzir o número de configurações candidatas. Um critério semelhante foi utilizado por Baran & Wu (1989) para determinar o ramo a ser trocado na reconfiguração, mas introduzindo dois diferentes métodos para um cálculo de fluxo de carga aproximados, processados depois da troca de cada ramo. Morelato e Monticelli (1989) também apresentam em seu trabalho uma estratégia de busca equipada com regras práticas (baseadas na experiência do operador) para resolver problemas como serviço de restauração e reconfiguração de sistemas. Para resolver tais problemas os autores usam um processo de busca heurística em árvore de decisão binária, que permite percorrer o espaço de possibilidades do estado do sistema, enquanto que o conhecimento de domínio específico é essencial para limitar o tamanho da árvore de decisão, evitando uma explosão combinatorial mantendo o problema dentro de um tamanho gerenciável.

Neste trabalho é apresentado um algoritmo heurístico para reconfiguração de redes de distribuição como propósito obter-se um conjunto de configurações como propostas de operação com perdas mínimas nos alimentadores. Na metodologia proposta utiliza-se um limite de queda de tensão como mecanismo de filtragem para exclusão das configurações menos promissoras efetuando-se a poda na árvore de configurações, de modo a diminuir o número de configurações candidatas. Para melhorar o desempenho do algoritmo proposto foi implementado e testado um método de cálculo de fluxo de carga aproximado e de processamento rápido com precisão adequada ao propósito da reconfiguração. Também foi desenvolvido um coeficiente de balanço de carga que demonstra a qualidade dos resultados obtidos com o algoritmo proposto e implementado.

2 Formulação Do Problema

O problema da reconfiguração de redes de distribuição pode ser formulado como um problema de programação não-linear com variáveis inteiras, cuja solução envolve a seleção dentre todas as configurações possíveis, daquela que tem a menor perda e que satisfaça a um conjunto de restrições tais como: radi-

alidade do sistema, níveis aceitáveis de tensão, confiabilidade, etc. O problema pode ser formulado como:

$$\text{Min } P_k = \sum_{i=1}^{NR} R_i * I_i^2 \quad (1)$$

s.a.

- radialidade;
- restrições de níveis de tensão;
- restrições de confiabilidade;
- restrições de balanço de carga entre os alimentadores;
- variáveis inteiras e contínuas;

Em que:

- $k \in K$; K conjunto de todas as configurações radiais factíveis para o sistema;
- P_k : perdas ativas em todos os ramos da configuração k ;
- NR : número de ramos da configuração k ;
- R_i : resistência do i -ésimo ramo da configuração k ;
- I_i : corrente no i -ésimo ramo da configuração k .

Este tipo de problema é de difícil tratamento devido à sua natureza combinatorial além da dificuldade na formulação matemática de certas restrições como a radialidade. Tem-se também o problema das variáveis inteiras e contínuas, o que torna o problema misto e de tratamento ainda mais difícil.

3 Metodologia Desenvolvida

Para resolução do problema de reconfiguração foi desenvolvida uma metodologia heurística que contempla as restrições na formulação (1) e possui um critério para cortar configurações que não deverão ser analisadas. O critério é baseado na máxima queda de tensão permitida nos alimentadores. O objetivo da metodologia desenvolvida é procurar um critério eficiente e simples de poda na árvore de configurações de modo a excluir as configurações menos promissoras. A exclusão de configurações que não sejam promissoras visa evitar que elas sejam novamente chaveadas e a árvore cresça excessivamente. A restrição de radialidade envolvida na formulação do problema (1) é de difícil representação matemática e foi tratada no algoritmo utilizando regras de programação não muito fáceis de implementar, mas que obtiveram sucesso.

A estratégia de poda procura sempre manter ativas as configurações mais promissoras, para que seja possível encontrar não uma configuração ótima, mas sim, um conjunto de configurações com os menores valores de perdas possíveis, satisfazendo as restrições de operação e até mesmo o aspecto de confiabilidade por causa das várias propostas de operação dadas por esse conjunto de configurações.

Seguindo esta metodologia foi implementado um esquema que exclui as configurações que excedem um limite de queda de tensão. Esse limite de queda de tensão deve ser predeterminado por meio de testes para cada sistema. Na verdade, trabalha-se com a densidade de carga por regiões do sistema. Densida-

de essa que tende a distribuir-se homogeneamente entre os alimentadores do sistema.

3.1. Algoritmo de busca de configurações radiais

O algoritmo implementado identifica a partir de um conjunto de chaves fechadas e outro de chaves abertas a configuração inicial do sistema. A configuração inicial está no *nível n0* da árvore de configurações, e cada conjunto de configurações geradas com o fechamento de cada chave aberta forma um outro nível. Desse modo ao se fechar a primeira chave aberta formar-se-á o *nível n1* da árvore, com o conjunto de configurações que são geradas a partir das configurações do nível anterior, neste caso, apenas o *nível n0*. Quando se tratar da segunda chave aberta a ser fechada, serão tomadas todas as configurações dos níveis anteriores para serem chaveadas, isto é, as configurações dos *níveis n0 e n1*, para gerar as configurações do *nível n2*. E assim é feito até que sejam tomadas para efetuar o chaveamento todas as chaves abertas da configuração inicial (CI).

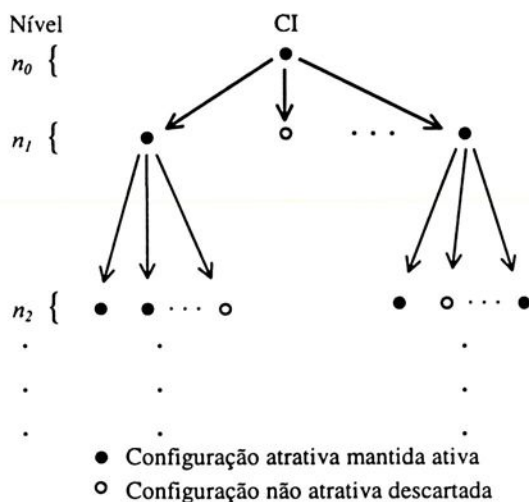


Figura-01 - Níveis da árvore de configurações

Na árvore de configurações o número de níveis será igual ao número de chaves de interconexão que existirem no sistema. Em cada nível existirão as configurações mais atrativas que permanecerão ativas e gerarão outras configurações nos níveis subsequentes, e também existirão as configurações que não são atrativas e que são descartadas logo ao serem encontradas.

Da mesma maneira que alguns autores desenvolveram um método de poda na árvore das configurações, procurou-se estabelecer um método que reduza o conjunto de configurações a serem examinadas. Esse método de poda na árvore das configurações exclui as menos promissoras logo que são encontradas. Baseado nestes aspectos, desenvolveu-se um algoritmo que a partir de uma configuração radial inicial, que permite gerar todas ou quase todas as configurações.

Os passos seguidos pelo algoritmo estão descritos abaixo:

Passo (i) - Identificar a configuração inicial;

Passo (ii) - Fechar chave de interconexão inicialmente aberta;

Passo (iii) - Identificar nos níveis anteriores a configuração a ser chaveada.

Passo (iv) - Examinar as configurações geradas.

Para cada configuração gerada:

- verificar a sua singularidade;
- processar o fluxo de potência radial para a configuração;
- verificar o limite de queda de tensão para cada alimentador;
- se a maior queda de tensão da configuração está dentro do limite predeterminado, adicionar a configuração encontrada na listagem do nível *n*, e calcular a perda da mesma, caso contrário descartar;

Passo (v) - Foram tomadas todas as configurações encontradas nos níveis anteriores? Se *sim* ir ao *passo (vi)*, se *não* voltar ao *passo (iii)*;

Passo (vi) - Foram fechadas todas as chaves de interconexão inicialmente abertas? Se *sim* ir ao *passo (vii)*, se *não* voltar ao *passo (ii)*;

Passo (vii) - Escolher dentre as configurações encontradas um conjunto de tamanho também predeterminado das melhores configurações, isto é, as que têm a menor perda.

Passo (viii) - Imprimir as melhores configurações encontradas com seus respectivos valores de perdas.

Como a queda de tensão está diretamente ligada às perdas do sistema, a poda do número de configurações está sendo realizada com base nesse valor de queda de tensão, ou seja, se uma configuração tem uma certa queda de tensão que está acima do limite predeterminado as configurações que se originarem daquela serão descartadas.

3.2. Método aproximado de fluxo de carga

Para melhorar a performance do algoritmo foi implementado um método aproximado de fluxo de carga semelhante ao encontrado em Baran e Wu (1989) chamado pelos autores de "*Forward Update DistFlow*". A diferença está nas equações utilizadas que são mais simples, tornando o método rápido e na inclusão de iterações que torna sua precisão adequada para o problema em questão. O método é descrito a seguir.

Supondo que o alimentador-I de acordo com a Fig. 02 tenha a tensão V_0 determinada e que as cargas concentradas nos pontos são dadas por $S_1, S_2, \dots, S_k$. A impedância de cada ramo é dada por $z_i = r_i + jx_i$.

O processo parte da concentração de carga em todos os nós do sistema. A concentração de carga em cada nó é feita somando-se todas as cargas ligadas ao mesmo, direta ou indiretamente, caminhando-se em direção contrária ao alimentador ou subestação. Para isso é feita uma busca na listagem dos ramos onde é

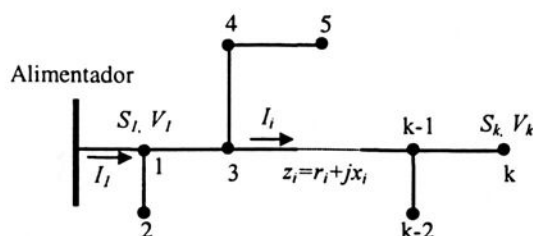


Figura-02 – Estrutura de um alimentador radial

verificado se existem ramificações em cada nó do alimentador, o que torna a busca um pouco trabalhosa e depende da ordenação feita previamente.

$$S_{conci} = \sum_{j=i+1}^k S_j \quad (2)$$

Em que S_{conci} é vetor carga acumulada.

Depois de feita esta concentração de cargas é calculada a corrente I_i no ramo i pela Eq. 3:

$$I_i^{(p)} = \frac{S_{conci}}{V_{i-1}^{(p)}} \quad (3)$$

Em que p indica a iteração em que está o processo.

A tensão utilizada para calcular a corrente no ramo i é aquela do nó emissor do ramo. Com a corrente I_i é calculada a queda de tensão no ramo i .

$$\Delta V_i^{(p)} = Z_i * I_i^{(p)} \quad (4)$$

A tensão no nó receptor do ramo é calculada pela subtração da queda da tensão do nó emissor.

$$V_i^{(p)} = V_{i-1}^{(p)} - \Delta V_i^{(p)} \quad (5)$$

Tem-se então, a tensão aproximada em todos os nós do sistema. Isto é feito para cada alimentador do sistema, se houver mais de um.

O teste de convergência é feito pela comparação entre as tensões da iteração corrente com a iteração anterior.

$$\Delta V_{Tot} = V_i^{(p)} - V_i^{(p-1)} \quad (6)$$

Se ΔV_{Tot} de algum nó do sistema for maior que uma tolerância especificada o processo é repetido até atingir a convergência.

3.3. Coeficiente de balanço de carga

O coeficiente de balanço de carga desenvolvido reproduz a distribuição da carga nos alimentadores como uma relação da carga pela distância ao alimentador. Esse coeficiente foi utilizado para a demonstração da eficiência do método desenvolvido.

De acordo com a Fig. 02 tem-se as cargas $S_1, S_2, \dots, S_k$ nos pontos $1, 2, \dots, k$, e a impedância do ramo i dada por $z_i = r_i + jx_i$. Sendo o ponto k (Fig. 02) a extremidade de uma chave de interconexão, é tomada a parte real da carga acumulada pela Eq. 2 e também é encontrada para cada ponto de carga ligado ao ponto k , a resistência do mesmo até o alimentador.

O coeficiente de balanço de carga para o ponto k considerado como extremidade de uma chave de interconexão pode se calculado como:

$$coef = \sum_{i \in L} \frac{P_{conci}}{r_i} \quad (7)$$

Em que P_{conci} é a parte real do vetor S_{conci} da Eq. 2, L é o conjunto de pontos de carga que ligam diretamente uma extremidade da chave ao alimentador e r_i é a resistência do nó até o alimentador.

4 Resultados Obtidos

Foram realizados testes com 3 sistemas hipotéticos conhecidos na literatura especializada para a obtenção dos resultados. Os três sistemas são de 14 barras (Cinvalar et al., 1988), 32 barras (Goswami e Basu, 1992) e 69 barras (Chiang e Jean-Jumeau, 1990). Para verificar a precisão do cálculo de queda de tensão proposto neste trabalho e a adequação do mesmo aos propósitos desta pesquisa, que é a obtenção de um método eficiente, rápido, simples e seguro para a análise e reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica, comparou-se então o método de fluxo de carga aproximado desenvolvido e implementado com um método iterativo tipo Newton desenvolvido para sistemas de alta tensão que apresenta uma boa precisão e segurança. Inicialmente foi calculado pelos dois métodos as perdas da configuração inicial de cada sistema testado. Depois de encontradas as melhores configurações calculou-se também pelos dois métodos as perdas para a melhor configuração encontrada para cada sistema testado. O coeficiente de balanço de carga também foi calculado para os três sistemas para as configurações inicial e ótima e tiradas as conclusões.

4.1. Sistema de 14 barras

O primeiro sistema tem 14 barras, 3 chaves de interconexão, tensão 23 KV, potência base 100 MVA e seus dados completos encontram-se em Cinvalar et al. (1988). As chaves de interconexão para a configuração inicial do sistema de 14 barras são 15-21-26 e para a configuração ótima são 17-19-26.

Na Tabela I estão os resultados da comparação dos dois métodos de fluxo de carga para a configuração inicial e ótima e na Tabela II está o conjunto das 5 melhores configurações.

Tabela I: Perda nas configurações inicial e ótima
Sistema de 14 barras.

Sistema de 14 barras	Perdas em KW		Erro Percentual
	Mét. Aprox.	Mét. Newton	
Conf. inicial	529.61	547.72	3.31 %
Conf. ótima	496.25	510.76	2.84 %

Tabela II: Conjunto das melhores configurações
Sistema de 14 barras.

Configuração	Perda (KW)
17-19-26	496.25
15-17-26	511.08
19-21-26	514.33
14-17-19	519.47
15-21-26	529.61

4.2. Sistema de 32 barras

O segundo sistema tem 32 barras, 5 chaves de interconexão, tensão de 12,66 KV, potência base de 10 MVA e seus dados completos encontram-se em Goawami e Basu (1992). Para o sistema de 32 barras as chaves de interconexão são 33-34-35-36-37 para a configuração inicial e 07-09-14-32-37 para a configuração ótima.

Na Tabela III estão os resultados da comparação dos dois métodos de fluxo de carga para o sistema de 32 barras e na Tabela IV está o conjunto das 10 melhores configurações.

Tabela III: Perda nas configurações inicial e ótima
Sistemas de 32 barras.

Sistema de 32 barras	Perdas em KW		Erro Percentual
	Mét. Aprox.	Mét. Newton	
Conf. inicial	190,03	202,68	6,24 %
Conf. ótima	134,08	139,55	3,92 %

Tabela IV: Conjunto das melhores configurações
Sistema de 32 barras.

Configuração	Perda (KW)
07-09-14-32-37	134,08
07-10-14-32-37	134,76
07-09-14-28-32	134,79
07-10-14-28-32	135,47
07-11-14-32-37	135,61
07-11-14-28-32	136,32
07-09-14-36-37	136,33
07-09-14-28-36	136,49
07-09-14-31-37	136,79
07-10-14-36-37	136,80

4.3. Sistema de 69 barras

O terceiro sistema tem 69 barras, 5 chaves de interconexão, tensão 12,66 KV, potência base de 100 MVA e seus dados completos encontram-se em Chiang e Jean-Jumeau (1990). Para o sistema de 69 barras as chaves de interconexão são 70-71-72-73-74 para a configuração inicial e 15-57-62-70-71, 15-59-62-70-71 e 15-56-62-70-71 para as três configurações ótimas, pois apresentam a mesma perda.

Na Tabela V estão os resultados da comparação dos dois métodos de fluxo de carga para o sistema de 69 barras e na Tabela VI está o conjunto das 10 melhores configurações.

Tabela V: Perda nas configurações inicial e ótima
Sistema de 69 barras.

Sistema de 69 barras	Perdas em KW		Erro Percentual
	Mét. Aprox.	Mét. Newton	
Conf. inicial	20,44	20,87	2,06 %
Conf. ótima	9,28	9,43	1,59 %

Nas Tabelas I, III e V em que há a comparação entre as perdas obtidas pelo método aproximado implementado e por Newton, pode-se notar que a diferença percentual é pequena. Os três sistemas têm topologia e carga diferentes. Isto pôde testar a eficiência do método de fluxo de carga implementado,

mostrando que tem uma boa eficiência para o problema da reconfiguração.

Tabela VI: Conjunto das melhores configurações
Sistema de 69 barras.

Configuração	Perda (KW)
15-57-62-70-71	9,2770
15-59-62-70-71	9,2770
15-56-62-70-71	9,2770
15-58-62-70-71	9,2770
14-59-62-70-71	9,2844
14-56-62-70-71	9,2844
14-57-62-70-71	9,2844
14-58-62-70-71	9,2844
13-57-62-70-71	9,2930
13-59-62-70-71	9,2930

No caso dos sistemas de 32 e 69 barras foram tomadas dez configurações por causa da diferença nas perdas de cada uma ser muito pequena.

Para os sistemas testados foram obtidos os mesmos resultados apresentados por Gallego et al. (1995) e por Chiang e Jean-Jumeau (1990), entre outros, mostrando que o algoritmo tem um bom desempenho.

O coeficiente de balanço de carga foi calculado para os três sistemas testes nas configurações inicial e ótima.

Tabela VII – Coeficientes de balanço de carga para a configuração inicial do sistema de 14 barras.

Chave	Coef. lado esq.	Coef. lado dir.	Dif. Perc.
15	1,326882	1,924306	31,05 %
21	1,418182	0,513636	63,78 %
26	1,372003	0,662387	51,72 %

Tabela VIII – Coeficientes de balanço de carga para a configuração ótima do sistema de 14 barras.

Chave	Coef. lado esq.	Coef. lado dir.	Dif. Perc.
17	1,727273	1,456402	15,68 %
19	1,227273	0,671212	45,31 %
26	1,452003	1,073636	26,06 %

Nota-se que há uma diminuição na diferença percentual dos coeficientes de cada lado das chaves de interconexão da configuração inicial para a configuração ótima indicando que houve uma distribuição mais homogênea das cargas entre os alimentadores do sistema ou entre as ramificações de um mesmo alimentador. Aqui não consegue-se uma distribuição tão homogênea, que seria uma diferença percentual semelhante e pequena para as três chaves de interconexão, devido a característica do sistema de ser pequeno e com cargas grandes que não podem ser particionadas.

Tabela IX – Coeficientes de balanço de carga para a configuração inicial do sistema de 32 barras.

Chave	Coef. lado esq.	Coef. lado dir.	Dif. Perc.
33	82,089444	67,240305	18,09 %
34	82,277111	82,851063	0,69 %
35	82,659615	67,290414	18,59 %
36	82,913765	83,518027	0,72 %
37	75,896191	83,123908	8,70 %

Tabela X – Coeficientes de balanço de carga para a configuração ótima do sistema de 32 barras.

Chave	Coef. lado esq.	Coef. lado dir.	Dif. Perc.
07	74,148957	76,601291	3,20 %
09	76,786230	76,599722	0,24 %
14	76,623418	76,906439	0,37 %
32	75,400856	77,206522	2,34 %
37	72,760064	75,267209	3,33 %

Para o sistema de 32 barras a diferença percentual entre os coeficientes da configuração inicial é grande e heterogênea enquanto que a diferença percentual entre os coeficientes é pequena e homogênea indicando uma boa distribuição da carga entre as ramificações do sistema. O fato das diferenças percentuais terem tal característica deve-se ao fato do sistema ter cargas pequenas, facilitando a distribuição das mesmas entre os alimentadores ou ramificações.

Tabela XI – Coeficientes de balanço de carga para a configuração inicial do sistema de 69 barras.

Chave	Coef. lado esq.	Coef. lado dir.	Dif. Perc.
70	60,828606	53,745858	11,64 %
71	60,830190	60,831979	0,00 %
72	60,787125	60,855015	0,11 %
73	60,832128	54,268548	10,79 %
74	60,830861	53,746138	11,65 %

Tabela XII – Coeficientes de balanço de carga para a configuração ótima do sistema de 69 barras.

Chave	Coef. lado esq.	Coef. lado dir.	Dif. Perc.
15	59,035285	54,488524	7,70 %
57	59,035750	54,503203	7,68 %
62	59,033417	60,657977	2,68 %
70	60,659588	54,505634	10,15 %
71	59,035760	54,497619	7,69 %

Aqui também nota-se uma homogeneidade entre as diferenças percentuais dos coeficientes de cada chave de interconexão.

O fato de os coeficientes serem mais homogêneos nas configurações ótimas indica que ao caminhar-se em direção às configurações de melhor qualidade a diferença percentual entre os coeficientes tende a diminuir.

5 Conclusões

Neste trabalho apresenta-se um algoritmo heurístico simples, eficiente e robusto na resolução do problema da reconfiguração de redes raiais de sistemas de distribuição. O método implementado de fluxo de carga mostrou-se preciso e rápido adequado para solução do problema de reconfiguração. Também pelo coeficiente de balanço de carga demonstrou-se a eficácia do método de poda na árvore de configurações pelo critério do limite máximo de queda de tensão.

O programa computacional desenvolvido a partir da metodologia proposta fornece como resultado um conjunto de configurações com os menores valores de perdas. Estes valores de perdas, dependendo do sistema analisado, são muito próximos, mostrando

que às vezes não há alterações significativas nos valores das perdas quando se passa de uma configuração para outra, ficando a cargo do operador efetuar aquelas que se apresentem mais viáveis sob os aspectos operacionais. As configurações obtidas apresentam excelente qualidade, mas devido ao tratamento heurístico empregado para a solução do problema, não se pode garantir que são ótimas, uma vez que não é realizada uma busca exaustiva verificando-se todas as opções possíveis de chaveamento. Nos sistemas testados verificou-se que entre as melhores configurações obtidas estão também as obtidas por outros autores e relatadas na literatura.

Pesquisas estão sendo desenvolvidas, visando estudar e avaliar a abordagem de sistemas com desequilíbrio de carga; obtenção de heurísticas que permitam ordenar as chaves abertas/fechadas do sistema com vistas a um metodologia mais eficiente que permita passar de uma configuração radial a outra e o uso mais sistemático do coeficiente de balanço de carga juntamente com o valor de queda de tensão como critério heurístico de poda de configurações na árvore de decisão.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

Referências

- Baran, M. E. e Wu, F. F. (1989). Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No.2.
- Chiang, H.D. e Jean-Jumeau, R.M. (1990). Optimal Network Reconfigurations in Distribution Systems: Part 2: Solution Algorithms and Numerical Results, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No.3.
- Civanlar, S., Grainger, J. J., Yin, H. e Lee, S. S. H. (1988). Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, No.3.
- Gallego, R. A., Monticelli, A. e Romero, R. (1995). Um Método Aproximado de Otimização Usado na Reconfiguração de Redes de Distribuição, In: *Anais do XI Congresso Chileno de Ingeniería Eléctrica*, Punta Arenas, pp. A086 - A091.
- Goswami, S.K. e Basu, S.K. (1992). A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No.3.
- Morelato, A. L. e Monticelli, A. (1989). Heuristic Search Approach to Distribution Systems Restoration, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No.4.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
AV. BRASIL, 56 - CAIXA POSTAL 31
15385-000 - ILHA SOLTEIRA - SP**

