

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

E S T U D O D E A L T E R N A T I V A S D E

C O N T R O L E P R E V E N T I V O E / O U C O R R E T I V O

A T R A V É S D E

M A N O B R A S S O B R E A T O P O L O G I A D A R E D E

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

JOÃO ODILON FREITAS E SILVA

FLORIANÓPOLIS, JULHO 1989

11

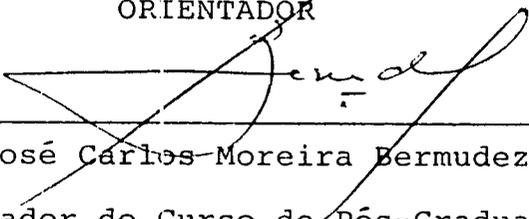
ESTUDO DE ALTERNATIVAS DE
CONTROLE PREVENTIVO E/OU CORRETIVO
ATRAVÉS DE
MANOBRAS SOBRE A TOPOLOGIA DA REDE

JOÃO ODILON FREITAS E SILVA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
ENGENHARIA - ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA E APROVADA EM SUA
FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO.



Prof. Luiz Jairo Branco Machado, Dr. Ing.
ORIENTADOR



Prof. José Carlos Moreira Bermudez, Ph.D.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica

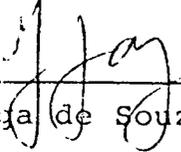
APRESENTAÇÃO PERANTE A BANCA EXAMINADORA COMPOSTA DOS PROFESSORES



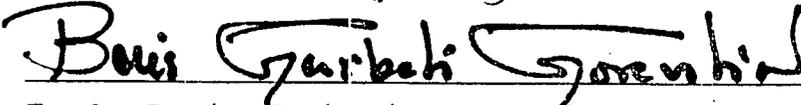
Prof. Luiz Jairo Branco Machado, Dr. Ing.



Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.



Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, Dr. Sc.



Engº. Boris Garbati Gorenstin, M. Sc.

À minha esposa, Mariinha,
meus filhos, Renata e Marcelo,
meus pais, sogros e irmãos.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Luiz Jairo Branco Machado, pela sua dedicação e compreensão e pelos ensinamentos transmitidos durante a orientação deste trabalho.

Ao Professor Antônio José Alves Simões Costa, pelo incentivo e ajuda dados desde o meu primeiro interesse pela elaboração da dissertação de mestrado.

Aos Engos. Márcio Mendonça Nogueira da Gama e Álvaro Fleury Veloso da Silveira, da ELETRONORTE, pela compreensão e apoio dados à realização deste trabalho.

Aos meus familiares, pelo incentivo e compartilhamento das dificuldades vividas durante a elaboração deste trabalho e da satisfação pela sua conclusão. Em especial à minha irmã Maria Idalina pela ajuda na elaboração do relatório final.

S U M Á R I O

RESUMO	x
ABSTRACT	xi
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	
1.1 - Aspectos Gerais	1
1.2 - Aspectos Básicos do Problema - Breve Descrição do Problema	2
1.3 - Motivação Básica	3
1.4 - Objetivo do Trabalho	4
1.5 - Origem e Natureza do Problema	5
1.5.1 - Da Origem do Despacho de Geração ao Fluxo de Potência ótimo	5
1.5.2 - Incorporação de Restrições de Segurança ao Despacho de Geração	6
1.6 - Breve Histórico do Desenvolvimento do Problema - Revisão Bibliográfica	7
1.6.1 - Aparecimento da Otimização da Topologia da Rede como Ação de Controle	7
1.6.2 - Desenvolvimento do Problema	8
1.7 - Definição do Problema Básico	14
1.8 - Formulação Matemática do Problema - Formulação das Técnicas de Solução	14
1.9 - Principais Contribuições Deste Trabalho	15
1.10- Organização Deste Trabalho	16

CAPÍTULO 2 - ASPECTOS GERAIS DO PROBLEMA

2.1 - Introdução	18
2.2 - Análise de Segurança em Tempo Real	18
2.3 - Despacho de Geração em Tempo Real - DGTR	19
2.4 - Despacho de Segurança em Tempo Real - DS	21
2.5 - Mudanças na Topologia da Rede	22
2.6 - Filosofia Adotada neste Trabalho	24
2.6.1 - Fluxo de Potência	24
2.6.2 - Sistemática de Seleção das Manobras.....	25
2.6.3 - Critérios Adotados	26

CAPÍTULO 3 - FORMULAÇÃO DO MODELO (ASPECTOS CONCEITUAIS)

3.1 - Introdução	27
3.2 - Formulação do Modelo da Rede	27
3.3 - Formulação do Modelo do FLUP - RMSC	27
3.3.1 - Despacho de Geração em Tempo Real	28
3.3.2 - Seleção das Linhas Chaveáveis	28
3.3.3 - Mudança da Topologia da Rede	28

CAPÍTULO 4 - FORMULAÇÃO MATEMÁTICA E TÉCNICAS DE SOLUÇÃO DO PROBLEMA

4.1 - Introdução	30
4.2 - Formulação Geral do Problema do DGTR	30
4.2.1 - 1 ^o Sub-problema - Despacho de Segurança - DS.....	30
4.2.2 - 2 ^o Sub-problema - Despacho Econômico - DE	33

4.3 - Formulação Matemática do Problema da Seleção das Linhas Chaveáveis do Sistema	33
4.3.1 - Expressões das Correntes nas Linhas em Função das Correntes das Linhas Chaveáveis .	33
4.3.2 - Formulação do Critério de Seleção das Linhas Chaveáveis	39
4.3.3 - Casos Especiais do Critério de Seleção das Linhas Chaveáveis	42
4.3.3-a - Casos em que a Corrente do Ramo Sobrecarregado é Negativa	42
4.3.3-b - Casos em que a Linha Sobrecarregada é Linha Chaveável	45
4.3.3-c - Casos em que Existe Mais de uma Linha Sobrecarregada	46
4.3.4 - Simplificação do Método de Seleção das Linhas Chaveáveis	48
4.4 - Formulação Geral do Problema do DMTR	57
4.4.1 - Problema do 1 ^o Nível - Determinação da Melhor Alternativa de Mudança na Topologia da Rede	60
4.4.2 - Problema do 2 ^o Nível - Determinação dos Desvios e Alívios de Carga para a Nova Topologia Resultante	60
 CAPÍTULO 5 - DESCRIÇÃO DO PROGRAMA DESENVOLVIDO	
5.1 - Introdução	61
5.2 - Programa Desenvolvido para a Solução do Problema do DGTR e do DMTR	61

5.3 - Programa Desenvolvido para a Solução do Problema do FLUP - RMC	61
5.3.1 - Introdução	61
5.3.2 - Entrada de Dados	62
5.3.3 - Algoritmo do Programa FLUP - RMC	63
5.3.4 - Fluxograma Completo do Programa FLUP - RMC .	64
5.4 - Programa Desenvolvido para Seleção das Linhas Chaveáveis (SELIC)	66
5.4.1 - Introdução	66
5.4.2 - Entrada de Dados	67
5.4.3 - Algoritmo do Programa SELIC	68
5.4.4 - Fluxograma Completo do Programa SELIC	74
5.5 - Programa Desenvolvido para Solução do Problema do FLUP - RMC com a Rotina SELIC (FLUP-RMSC)	74
5.5.1 - Introdução	74
5.5.2 - Entrada de Dados	76
5.5.3 - Algoritmo do Programa FLUP-RMSC	76
5.5.4 - Fluxograma Completo do Programa FLUP-RMSC ..	78

CAPÍTULO 6 - RESULTADOS

6.1 - Introdução	79
6.2 - Aplicação do Programa SELIC do Sistema AEP - 14	80
6.2.1 - Dados e Comentários	80
6.2.2 - Resultados Obtidos da Aplicação do Programa	86
6.2.3 - Análise dos Resultados	88
6.3 - Aplicação do Programa DMTR ao Sistema AEP - 14	89
6.3.1 - Resultados da Aplicação do DMTR	89
6.3.2 - Análise dos Resultados	90

6.4 - Conclusões	91
CAPÍTULO 7 - ANÁLISE DOS RESULTADOS E COMPARAÇÃO DOS ALGORITMOS	
7.1 - Introdução	93
7.2 - Análise Comparativa dos Algoritmos	93
7.3 - Análise Comparativa dos Tempos de Cálculo	98
7.4 - Conclusões a Respeito dos Resultados	101
CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES	
8.1 - Conclusões Finais do Trabalho	104
8.2 - Recomendações para Aperfeiçoamento do Programa FLUP- RMSC	105
8.3 - Sugestões para Futuros Trabalhos	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

R E S U M O

Neste trabalho é apresentada uma metodologia que permite a redução do número de manobras sobre a rede, a serem avaliadas durante o cálculo de ações de controle preventivo ou corretivo para alívio de sobrecargas, dentro da análise de segurança em tempo real.

Para solução do problema, foi desenvolvido um algoritmo de seleção de linhas chaveáveis (SELIC), baseado na teoria dos grafos, nas leis de Kirchhoff e nas equações dos laços.

Uma sistemática de integração da otimização da topologia da rede com as ações usuais de controle para alívio de sobrecargas reais ou potenciais é também apresentada.

Foi desenvolvido um algoritmo de fluxo de potência com ações de controle através de redespacho, manobra selecionada e corte de carga (FLUP-RMSC), com base nos programas Despacho de Geração em Tempo Real (DGTR) [01] e Determinação da Mudança Topológica da Rede (DMTR) [28] e no programa SELIC, que foram integrados de forma que o controle seja feito, em primeira instância, através do redespacho, seguido do chaveamento de circuito e, por último, se necessário, através também do corte de carga.

Ao final do trabalho, são apresentados resultados de testes dos algoritmos desenvolvidos sobre o sistema AEP - 14 e as principais conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

A B S T R A C T

A methodology which allows a reduction of the number of network switchings to be evaluated during the corrective or preventive control actions calculations, to alleviate overloads, within the real time security analysis, is presented.

The problem was solved by developing a switching lines selection algorithm (SELIC), which is based on graph theory, Kirchhoff's laws and loop equations.

A systematics to integrate the network topology optimization with the usual control actions to alleviate real or potential overloads is also presented.

A load flow algorithm was developed with control actions by means of rescheduling, selected switching and load shedding (FLUP-RMSC), which is based on the Real Time Generation Dispatch (DGTR) [01] and Network Topology Change Determination (DMTR) [28] algorithms and on the SELIC algorithm. They were integrated in such a way that the control is firstly made by rescheduling followed by the circuit switching and, at last, if necessary, also by load shedding.

In the end of this work, test results of the developed algorithms over the AEP - 14 System are presented, as well as the main conclusions and suggestions for further work.

C A P Í T U L O 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Aspectos Gerais

Os sistemas elétricos de potência têm evoluído em tamanho e complexidade. Da mesma forma, o acompanhamento das contínuas variações da condição de operação dos mesmos e as ações de controle pelo despachante, tornaram-se mais difíceis.

Condições de emergência podem desenvolver-se na operação diária de sistemas de potência devido a eventos aleatórios. Estas condições podem consistir de níveis de tensão inadequados ou sobrecargas de circuitos. O tempo disponível para o despachante avaliar e executar as ações necessárias de controle corretivo para restabelecimento das condições adequadas de operação, é limitado.

Estas ações consistem de ajustes de potência ativa e reativa dos geradores, ajustes dos taps dos transformadores, chaveamento de capacitores ou reatores e, se necessário, corte de carga.

No sentido de amenizar as dificuldades descritas, os centros de controle de sistema são, hoje, dotados de sistema de aquisição de dados e de programa de estimação de estado em tempo real, para proporcionar um conhecimento das condições reais do sistema ao despachante. Associados a estas facilidades, existem programas de aplicações avançadas, também em tempo real, que proporcionam a monitoração de segurança do

sistema. São as funções de segurança, que auxiliam o despachante na tomada de decisão em tempo real.

As ferramentas computacionais para as aplicações de segurança, são usualmente capazes de estabelecer ações possíveis de controle para alívio de violações das restrições operativas, possibilitando, desta forma, que o usuário receba o serviço de energia elétrica com um bom nível de qualidade e ao menor preço possível.

1.2 - Aspectos Básicos do Problema - Breve Descrição do Problema

O problema do controle de segurança tem sido extensivamente investigado. Quando a economia está envolvida, o problema é conhecido como um despacho econômico com restrições de segurança ou Fluxo Ótimo de Potência (FOP), que constitui uma das ferramentas que visam viabilizar a operação em tempo real dos sistemas de potência.

Um grande esforço foi dispendido no sentido de melhorar os cálculos do FOP, o qual permite vários tipos de ajuste no sistema, quais sejam: redespacho de potência ativa e reativa de fontes geradoras, mudança de tap de transformadores, fluxos em ligações DC e corte de carga.

Entretanto, uma importante classe de ações de controle permanece por ser representada nos algoritmos atualmente disponíveis: a modificação da topologia da rede através de ações de chaveamento. Esta é uma maneira muito efetiva

de redução de sobrecargas de circuitos e de violações de restrições de tensão.

Alguns algoritmos de manobra sobre a rede têm sido desenvolvidos, mas não são tão sofisticados ou completos como os algoritmos atualmente disponíveis para o FOP. Uma razão básica para isto, vem da dificuldade encontrada na representação de ações de chaveamento, devido a sua natureza combinatória.

A determinação de uma possível sequência de manobra, para correção de um problema na rede, envolve técnicas de busca combinatória, ao invés das técnicas numéricas dos métodos de otimização (e.g. Gradiente e Newton); utilizados nos modelos de despacho atuais. O número de possíveis configurações de chaveamento a serem pesquisadas é elevado, principalmente quando se consideram chaveamentos múltiplos. Neste caso, o número de configurações possíveis cresce exponencialmente com a ação combinada de manobras simples, tornando-se, até o momento, intratável, devido a problemas de dimensão.

1.3 - Motivação Básica

Verifica-se, hoje, um esforço no desenvolvimento de uma metodologia que permita uma integração da otimização da topologia da rede com as ações de controle do FOP, usuais. Foi trabalhando neste sentido que desenvolveu-se a pesquisa apresentada neste trabalho.

A metodologia desenvolvida permite o controle de sobrecarga nas linhas de transmissão através do redespacho de

geração, em primeira instância, seguido do chaveamento de circuito e, por último, se necessário, através também do corte de carga. O cálculo da alternativa de controle através do chaveamento de circuito, é precedido de uma seleção bastante efetiva das linhas chaveáveis do sistema. Desta forma, o número de candidatas fica significativamente reduzido, tornando mais viável a integração desta alternativa de controle ao FOP.

1.4 - Objetivo do Trabalho

Estudar e implementar alterações no programa básico de Determinação da Mudança Topológica da Rede-DMTR do LABSPOT da UFSC, bem como na sua associação com o programa de Despacho de Geração em Tempo Real-DGTR, também do LABSPOT da UFSC, visando:

- a) Adotar critérios não-puramente matemáticos (usar os conceitos da física do problema) para escolha das manobras candidatas à eliminação de sobrecargas;
- b) Desenvolver um método de seleção das linhas chaveáveis do sistema para reduzir o número de manobras candidatas a serem estudadas pelo DMTR;
- c) Integrar a alternativa de controle de sobrecarga em linha de transmissão ou de transformadores através da mudança na topologia da rede às alternativas de controle usuais do Fluxo de Potência;
- d) Adotar ordem de prioridade para a utilização das

alternativas de controle, após a integração da mudança da topologia da rede, de acordo com a ótica da operação de sistema.

1.5 - Origem e Natureza do Problema

1.5.1 - Da Origem do Despacho de Geração ao Fluxo de Potência Ótimo

O estudo do problema do despacho de geração teve seu início no princípio da década de 20, conforme afirmou Happ em 1977, quando os engenheiros dos sistemas de potência se defrontaram com o problema da distribuição da geração entre os diversos grupos geradores. O problema era exatamente o de como dividir a potência real entre as diversas unidades. Deste problema, surge inicialmente o Despacho Econômico ou Despacho Ótimo, o qual procura fornecer ao operador um plano de produção ótimo.

A partir da década de 30, vários métodos são usados, dentre os quais destaca-se o método do custo incremental, onde os equipamentos de produção são carregados até que o custo incremental dos diversos grupos seja igual. Na metade da década de 40, as perdas provenientes dos equipamentos de transmissão começam a ser consideradas e vão dando lugar ao conceito de fator de penalização.

No final da década de 50, a representação da fórmula das perdas e a formulação das equações de coordenação são

melhoradas. Isto ocorre ao mesmo tempo em que o fluxo de potência (também chamado de fluxo de carga) aparece, ajudado pelo desenvolvimento e surgimento dos computadores digitais. A partir desse momento os algoritmos do despacho de geração são melhorados e sofrem modificações significativas, tais como:

- a) formulação do Despacho Econômico Exato, pois, até então, somente era considerada a potência ativa;
- b) introdução das funções de segurança na operação dos sistemas de potência;
- c) linearização das equações do Despacho de Geração e a representação da rede por modelos lineares ou linearizados, sendo então possível a utilização das técnicas de programação linear [01].

As modificações introduzidas, aliadas ao rápido desenvolvimento da tecnologia computacional, tornou possível a aplicação, em tempo real, do despacho de geração.

1.5.2 - Incorporação de Restrições de Segurança ao Despacho de Geração

A incorporação das restrições de segurança, como parte do Despacho de Geração em Tempo Real, tem exercido uma profunda influência no despacho como um todo, sendo um elemento importante e necessário para a operação dos sistemas de potência, de modo mais eficiente e seguro [01].

O problema de despacho econômico com restrições de segurança (Fluxo Ótimo de Potência - FOP), foi originalmente formulado por Carpentier, em 1962 [25].

Principalmente, na última década, um grande esforço foi dispendido no sentido de melhorar os cálculos do despacho de geração com restrições de segurança, o qual permite todo tipo de ajuste possível no sistema, e.g. potência ativa de geração, potência reativa de geração, tapes de transformadores, corte de carga, etc, à exceção de manobras na rede.

1.6 - Breve Histórico do Desenvolvimento do Problema - Revisão Bibliográfica

1.6.1 - Aparecimento da Otimização da Topologia da Rede como Ação de Controle

O interesse em manobra na rede como um projeto de pesquisa em ação de controle corretivo, para fluxos de sistemas de potência, apareceu de maneira curiosa. Durante o projeto descrito num trabalho de Masiello e Wollenberg, publicado em 1981, foi conduzido um experimento no qual um modelo do sistema de potência foi ajustado para refletir uma condição de contingência que resultava em uma sobrecarga num ramo. Uma ação corretiva para esta sobrecarga foi calculada, usando uma solução de programação linear, e resultou num redespacho de geração. A mesma condição de contingência foi apresentada a um operador de sistema, num simulador de treinamento de despachante. A resposta

Inicial do operador à sobrecarga foi simplesmente manobrar a rede. Isto aliviou a sobrecarga e permitiu que a geração permanecesse com o carregamento econômico.

Infelizmente, os cálculos corretivos automáticos usados na pesquisa, somente permitiam variações de geração e ajustes de comutadores de tape. Não existia método analítico que pudesse contar como alguém poderia manobrar um sistema de transmissão de forma a acabar com uma sobrecarga [20].

1.6.2 - Desenvolvimento do Problema

O primeiro trabalho, com um tratamento algorítmico para o problema de mudanças na topologia da rede para alívio de sobrecargas, ou seja, otimização da topologia da rede, foi proposto por Koglin e Muller, em 1980. Desde então, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos para a solução do problema [28].

Nesse primeiro trabalho, é mostrado como o problema, pelo fato de existirem várias manobras possíveis, adquire um caráter combinatório. Para resolvê-lo, os autores propõem um método de solução baseado na enumeração de todas as manobras possíveis, usando uma técnica que requer um fluxo de carga DC, sobre uma rede reduzida, para cada variante de manobra.

Van Amerongen e Van Meeteren, em 1980, envolveram o problema de manobra numa técnica de programação inteira, que considerava redespacho de geração, corte de carga e manobras na rede como ações corretivas possíveis. Nesta técnica, as ações de manobra podem ser avaliadas em conjunto com redespacho e corte de

carga [20].

Num novo trabalho de Koglin e Muller, em 1981, é feita uma extensão do método originalmente apresentado, na tentativa de resolver o problema do número elevado de manobras possíveis. É proposto, no caso, uma avaliação das manobras. Um método chamado de "Injeção Invertida" ("Backward Injection") é usado para medir os efeitos de todas as manobras sobre a rede elétrica em estudo. Estes efeitos são avaliados por um conjunto de regras heurísticas e, assim, são selecionadas as melhores manobras, isto é, as que eliminam ou mais diminuem o nível das sobrecargas.

O inconveniente de tratar o problema com métodos como o mencionado acima, é o fato de se ter que examinar um grande número de manobras possíveis [28].

Dodu et al., em 1981, publicaram um artigo que fornece um teste sobre cada ação de manobra possível, calculando um conjunto de limites sobre uma função objetivo, baseada no risco de corte de carga. Não está claro se esta técnica fornece uma rápida seleção e nem o trabalho indica quais as possíveis ações de manobra testar.

Koglin e Muller, em 1982, novamente publicam um trabalho tratando o problema da redução do número de variantes de manobra, usando técnicas heurísticas [20].

Meliopoulos e Bakirtzis, num artigo de 1983, apresentam um procedimento baseado na programação linear para computação de controles relacionados com segurança. É uma abordagem prática que envolve experiências passadas e

avaliação de desempenho de várias metodologias. Ela permite a computação de controles de emergência tomando como base:

(a) mínima ação de controle;

(b) mínimo custo do controle.

A natureza discreta de alguns dos controles, como chaveamento de capacitores e reatores, é explicitamente modelada. Entretanto, a mudança da topologia da rede não é tratada.

Kronig e Glavitsch, também em 1983, colocam a ação de manobra numa técnica de programação linear, na qual cada ação é representada por um par de injeções de corrente. Seu maior inconveniente é a necessidade de se ter todos os fatores de distribuição de perda de linha calculados para as condições do fluxo de carga básico, antes do início da PL.

Em 1983, Koglin, agora com Medeiros, volta a publicar um artigo, reforçando a abordagem de avaliação das ações de manobra, na qual o método de "injeção invertida" é usado para calcular os efeitos de cada uma das ações. Os efeitos são analisados através de um conjunto de regras heurísticas, as quais, depois, orientam a eliminação de muitas ações e a seleção dos casos mais promissores.

Edwin e Eichler, em 1983, propõem uma abordagem que busca os efeitos das ações de chaveamento. Os efeitos são avaliados usando uma técnica de compensação sobre a matriz Jacobiana do Fluxo de Carga de Newton. Isto permite avaliações que levam em conta o fluxo de carga AC, ao invés do fluxo de carga DC, mas não aponta diretamente para o problema da redução do número de casos que devem ser examinados [20].

Gorenstin, em 1985, seguindo a mesma formulação do problema dada por Dodu et al., em 1981, usa uma técnica de programação linear mista. Para cada manobra considerada, é calculado um limite através de uma função objetivo, baseada no redespacho e risco de corte de carga. O estudo das alternativas de mudança de topologia inclui previamente um redespacho e corte de carga.

Num artigo de Mazi et. al., de 1986, é apresentada uma técnica que fornece um conjunto de manobras que são selecionadas pela sua efetividade. Não utilizam técnicas heurísticas para eliminação de possíveis ações de chaveamento. Utilizam fatores de distribuição (fatores de sensibilidade lineares) - apenas os elementos relevantes para as manobras consideradas - baseados no fluxo de carga DC. Após a seleção, as manobras são testadas com fluxo de carga AC, seguindo a ordem de efetividade. É mostrada a possibilidade de ação corretiva usando seccionamento de barra (bus-bar splitting), o que permite a avaliação do efeito da reconfiguração da subestação no controle.

Bacher e Glavitsch, em 1986, dando prosseguimento à linha de pesquisa desenvolvida juntamente com Kronig, desde 1983, publicam um artigo onde é usada injeção de corrente no terminal dos elementos chaveados, para simular mudança na topologia da rede. Esta corrente injetada é usada como variável de controle no processo de otimização. São formuladas funções objetivo com ajuda de método similar à PL. Através de sequência de chaveamentos, a função objetivo é trazida para o seu ótimo, considerando limites de tensão nodal e corrente máxima em linhas

e/ou transformadores. O modelo do sistema é exato (representação dos elementos complexa, i.e. parte ativa e reativa). Utiliza "fatores de distribuição" pré-computados para cada manobra antes do início do processo de otimização.

No artigo de Bakirtzis e Mellopoulos, de 1987, é mostrado o método apresentado em 1983, melhorado, para tratamento de chaveamento de capacitor/reator, baseado numa adaptação do algoritmo de penalização de Driebeck, para problemas de otimização discreta. O método original é iterativo. Ele atribui valores discretos a todas as variáveis capacitor/reator, uma a uma, sendo que cada atribuição requer uma solução de PL. O novo método, atribui valores discretos a todas as variáveis capacitor/reator, simultaneamente. Tipicamente, uma solução é obtida após duas soluções de PL.

Nesse artigo, é ainda apresentada a incorporação de um método eficiente para computação das operações de manobras de linhas, para alívio de condições anormais. Porém, estas são calculadas separadamente dos demais controles. O método é baseado na enumeração parcial seletiva dos casos discretos. A ordenação das manobras das linhas é feita de acordo com a efetividade no alívio das condições anormais existentes, e determinada através do cálculo de índices de desempenho (performance index - PI). Um fluxo de carga AC é rodado para cada manobra selecionada.

Ungaretti, em 1987, divide o problema do controle em tempo real para alívio de sobrecarga, via mudança na topologia da rede, em dois níveis, por tratar-se de um problema de programação linear mista: (1) Identifica a melhor manobra

dentre os chaveamentos possíveis, através da PL inteira do tipo zero-um, onde a manobra é simulada por injeções de compensação, e do método de separação e avaliação progressiva (Branch & Bound Method), que explora as características do problema, e (2) se a sobrecarga persiste após o primeiro nível, roda o Despacho de Segurança formulado como PL, para redespacho de geração e corte de carga. A solução só é aceita após confirmação dos resultados com um fluxo de carga AC. São consideradas retiradas simples e adições simples ou múltiplas de circuitos.

Nesse trabalho, o autor sugere que sejam feitos estudos sobre os efeitos de retirada e adição de circuitos na rede elétrica, de modo a encontrar uma possível regra heurística para ordenar as manobras segundo critérios de eficiência no alívio de sobrecargas, baseado na constatação de que os elementos do conjunto de circuitos chaveáveis, que mais diminuem os níveis de sobrecarga, encontram-se em algum laço fechado sobre os circuitos sobrecarregados.

No trabalho de Pereira et.al., de 1987, é apresentado um algoritmo de otimização da topologia da rede, que é baseado no modelo linearizado do fluxo de potência, e usa rotina de PL para redespacho e corte de carga e técnica de separação e avaliação progressiva para modificação da topologia da rede. Os chaveamentos de linhas são simulados através de injeções de compensação [25].

1.7 - Definição do Problema Básico

Existe um grande volume de literatura sobre funções econômicas/de segurança. Entretanto, a maioria dos métodos apresentados, pode ser criticada por não modelar a natureza discreta de alguns controles, como chaveamento de bancos de capacitores ou reatores, visando a correção de tensão e redução de perdas, e chaveamento de linhas de transmissão, visando alívio de sobrecargas e possivelmente de sobretensões. A presença de controles discretos convertem o problema do controle corretivo em problema de otimização discreta.

Pode-se observar, através da análise dos trabalhos que abordam os controles discretos, publicados desde 1980, que os métodos desenvolvidos para a solução do problema de mudanças na topologia da rede para alívio de sobrecargas, baseiam-se em algoritmos de enumeração ou de busca sistemática da solução.

A necessidade de avaliação de um número elevado de manobra de chaveamento de circuito do sistema gera um problema de dimensão para os métodos apresentados na literatura, uma vez que estes não possuem uma sistemática eficiente de seleção das ações de manobra possíveis.

1.8 - Formulação Matemática do Problema - Formulação das Técnicas de Solução

Para o cálculo do redespacho de geração e/ou corte de carga, o algoritmo apresentado neste trabalho baseia-se no modelo de fluxo de potência linearizado, e numa rotina de

programação linear rápida. Para a seleção das manobras candidatas, o algoritmo baseia-se na teoria dos grafos e numa rotina de busca, aplicada ao problema da determinação de trajetórias, para a determinação dos laços fundamentais do grafo. Para a identificação da melhor manobra dentre as manobras seleccionadas, o algoritmo é baseado numa rotina de programação linear inteira do tipo zero-um e num método de separação e avaliação progressiva (Branch & Bound Method) eficiente, que explora as características do problema. Portanto, de uma forma geral, o algoritmo baseia-se numa programação linear mista.

1.9 - Principais Contribuições Deste Trabalho

- Adoção de um critério não puramente matemático, que considera os conceitos da física do problema, para a escolha das manobras candidatas à eliminação de sobrecarga;
- Desenvolvimento de um método eficiente de seleção das linhas chaveáveis do sistema para reduzir o número de manobras candidatas a serem estudadas pelo programa de Determinação da Mudança Topológica da Rede, DMTR;
- Integração da alternativa de controle de sobrecarga em linha de transmissão ou transformadores, através da mudança na topologia da rede, às alternativas de controle usuais do Fluxo de Potência;
- Adoção de uma ordem de prioridade para

utilização das alternativas de controle, após a integração da mudança da topologia da rede, de acordo com a ótica da operação de sistema.

1.10 - Organização Deste Trabalho

No capítulo 2 é apresentada a localização do despacho de geração em tempo real dentro da cadeia de tratamentos em tempo real, assim como os aspectos do despacho de segurança e da mudança da topologia da rede, ressaltando aqueles relacionados com a integração das alternativas de controle. A filosofia adotada para a promoção desta integração é relatada, bem como a metodologia adotada na seleção das linhas chaveáveis do sistema.

O capítulo 3 trata da rede elétrica e do modelo do fluxo de potência com as ações de controle integradas, destacando o despacho de geração em tempo real, especialmente o despacho de segurança, a mudança na topologia da rede, visando o alívio de sobrecarga em linhas de transmissão, e o despacho de segurança após a mudança da topologia da rede.

No capítulo 4, é apresentada a formulação matemática geral e as técnicas de solução do problema do despacho de geração em tempo real, do problema da seleção das linhas chaveáveis candidatas a manobra ótima e do problema da determinação da melhor alternativa de mudança topológica da rede.

O capítulo 5 destina-se à apresentação do programa desenvolvido para a solução do fluxo de potência, na sua

forma descrita nos capítulos anteriores, passando pela preparação dos dados de entrada necessários, pela descrição do algoritmo e fluxograma, e finalmente tecendo considerações gerais sobre o programa.

Os resultados obtidos pela aplicação do programa, são apresentados no capítulo 6, juntamente com alguns comentários a respeito dos mesmos, de forma a alertar para os pontos mais expressivos.

No capítulo 7 é apresentada a análise comparativa dos resultados e dos tempos de cálculo obtidos usando os algoritmos com os casos estudados e são relatadas as conclusões tiradas quanto à coerência e validade dos mesmos.

No capítulo 8 são relatadas as conclusões finais sobre a pesquisa realizada, no que diz respeito ao atingimento dos objetivos perseguidos, à validade da metodologia utilizada e à eficiência do programa desenvolvido. As necessidades de modificações ou aperfeiçoamentos no programa apresentado neste trabalho, detectadas durante a realização da pesquisa, são apontadas, de forma a facilitar futuros desenvolvimentos do programa.

O capítulo 8 destina-se também, à divulgação de aspectos ainda não resolvidos quanto à mudança da topologia da rede, como alternativa de controle em tempo real, bem como de sugestões para aprimoramento e extensões do programa utilizado, e de estudos de outras metodologias alternativas que poderão ser exploradas para solução do problema.

Todos os documentos consultados, relacionados com o assunto pesquisado, estão listados no final do trabalho.

C A P Í T U L O 2

ASPECTOS GERAIS DO PROBLEMA

2.1 - Introdução

Neste capítulo é apresentada a localização da análise de segurança em tempo real dentro da cadeia de tratamentos em tempo real, assim como os aspectos do despacho de geração em tempo real, do despacho de segurança e da mudança da topologia da rede, ressaltando aqueles relacionados com a integração das alternativas de controle.

A filosofia adotada para a promoção desta integração é relatada, bem como a filosofia adotada na seleção das linhas chaveáveis do sistema.

2.2 - Análise de Segurança em Tempo Real

As ações de controle são executadas sobre os equipamentos de produção e transporte. Entretanto, estes equipamentos estão sujeitos a falhas, provocando saídas não programadas, podendo alterar a configuração da rede e atingir estados de operação indesejáveis, prejudicando a qualidade e continuidade do serviço.

A análise de segurança tem o objetivo de alertar a operação, com uma antecipação adequada, quanto às possibilidades de ultrapassagem de certos limites de produção transporte ou regulação, e possibilitar a execução de ação de

controle corretiva ou preventiva.

A figura 2.1 mostra os estudos realizados dentro da análise de segurança na cadeia de tratamentos em tempo real. Dentro destes estudos se tem o teste de detecção de sobrecargas através da função análise de contingência. Esta função pode ser executada para as condições previstas, automaticamente ou por solicitação do operador. Os resultados obtidos dos testes da análise de contingência revelam o estado de operação do sistema :

-normal-seguro: se a análise de uma lista de contingências pré-selecionadas não conduzir a nenhuma sobrecarga potencial;

-normal-alerta (inseguro): se a análise das contingências pré-selecionadas conduzir a pelo menos uma sobrecarga potencial.

Cabe ressaltar que dependendo da qualidade da lista de contingência, o estado revelado pode não ser real.

2.3 - Despacho de Geração em Tempo Real - DGTR

O despacho de geração constitui uma das ferramentas que visam viabilizar a operação em tempo real dos sistemas de potência, estabelecendo ações de controle através do redespacho de geração e do corte de carga.

Para cumprir seus objetivos, o tempo de processamento computacional e a precisão dos resultados fornecidos pelo despacho de geração em tempo real, devem estar dentro de níveis aceitáveis.

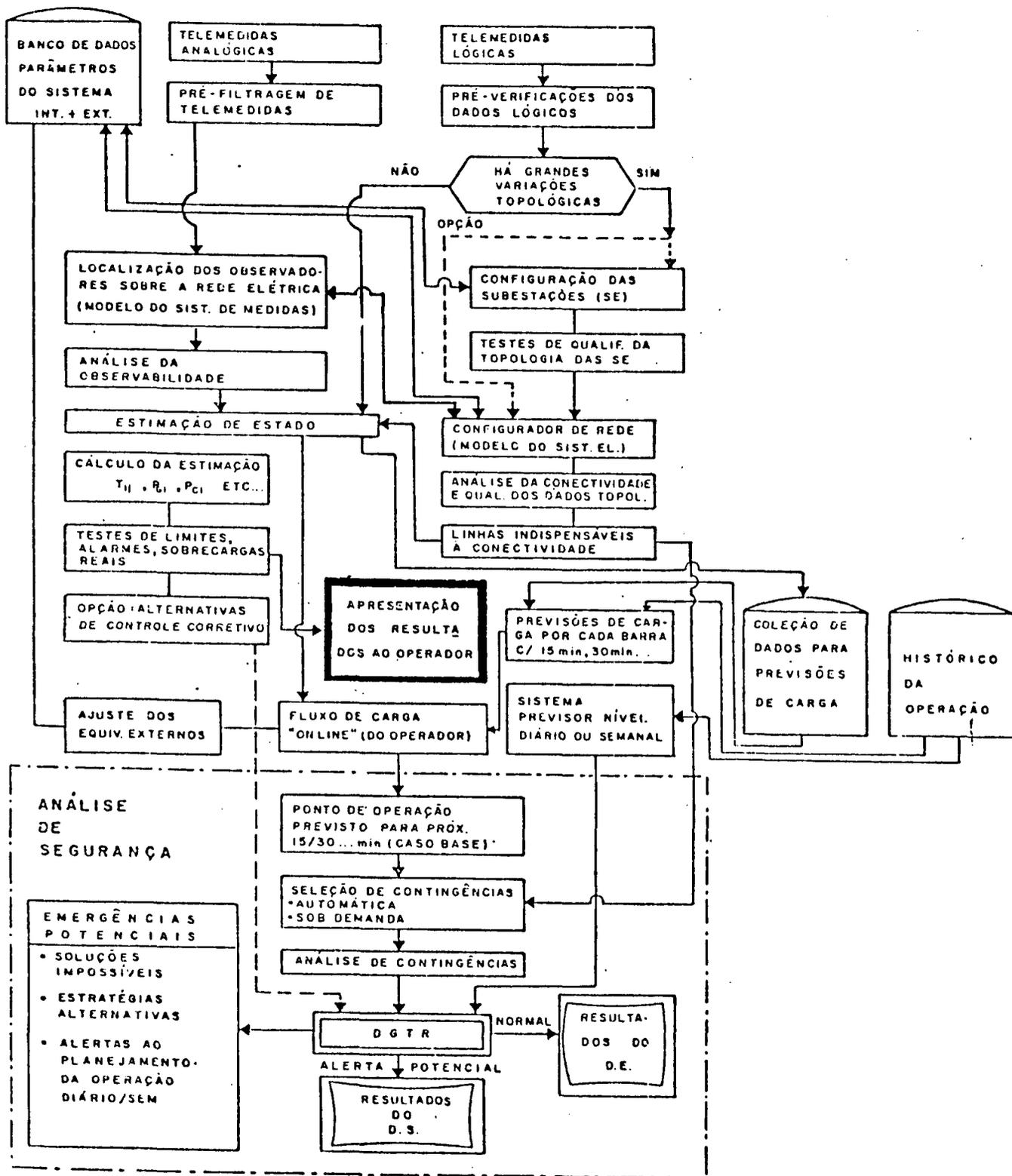


FIGURA 2.1 - Cadeia de Tratamentos em Tempo Real

A função despacho de geração tem como objetivo completar os estudos realizados dentro da análise de segurança, estabelecendo as estratégias de operação, para ações de controle preventivo e/ou corretivo, contra aqueles efeitos considerados nocivos ao sistema e/ou minimizar os custos de produção.

A função despacho de geração nos sistemas elétricos de potência, quando projetada para atuar completando a análise de segurança em tempo real, é chamada de despacho de geração em tempo real e atua tal como mostra a figura 2.1.

O despacho de geração em tempo real, tal como mostrado por e AGUILAR [01], é dividido em dois sub-problemas:

- despacho de segurança (DS) e o
- despacho econômico (DE).

Estes sub-problemas são definidos logo após o teste de detecção de sobrecarga da Análise de Segurança em tempo real, através da função Análise de Contingências.

2.4 - Despacho de Segurança em Tempo Real - DS

Este sub-problema é definido logo após o teste de detecção de sobrecarga da Análise de Segurança em tempo real, através da função Análise de Contingências. Uma vez atingido o estado Normal-Alerta (Inseguro), se recorre ao Despacho de Segurança. Pode-se recorrer também ao Despacho de Segurança, como uma opção, quando se está diante de sobrecargas reais, caracterizando o estado de Emergência Real, detectadas logo após os cálculos que se apóiam nos resultados da Estimação de Estado (figura 2.1).

Existem, no entanto, determinadas sobrecargas reais e sobrecargas potenciais que não são eliminadas através das ações de controle sugeridas pelo Despacho de Segurança. As ações de controle sugeridas pelo DS são:

- redespacho de geração das unidades geradoras e/ou
- alívio de carga.

Quando o Despacho de Segurança não encontra solução possível que elimine tais sobrecargas, se está diante de Emergências Potenciais (veja figura 2.1).

2.5 - Mudanças na Topologia da Rede

Buscar uma alternativa de solução para aqueles casos em que não foi possível encontrar uma saída através do Despacho de Segurança é o propósito do estudo de novas opções de controle dentro da Análise de Segurança em Tempo Real. Dentre estas opções, destacam-se as mudanças na topologia da rede visando o alívio de sobrecargas.

Na figura 2.2 é mostrado como as ações alternativas de controle via mudanças na topologia da rede, visando o alívio de sobrecarga, são consideradas dentro dos estudos feitos na Análise de Segurança em Tempo Real.

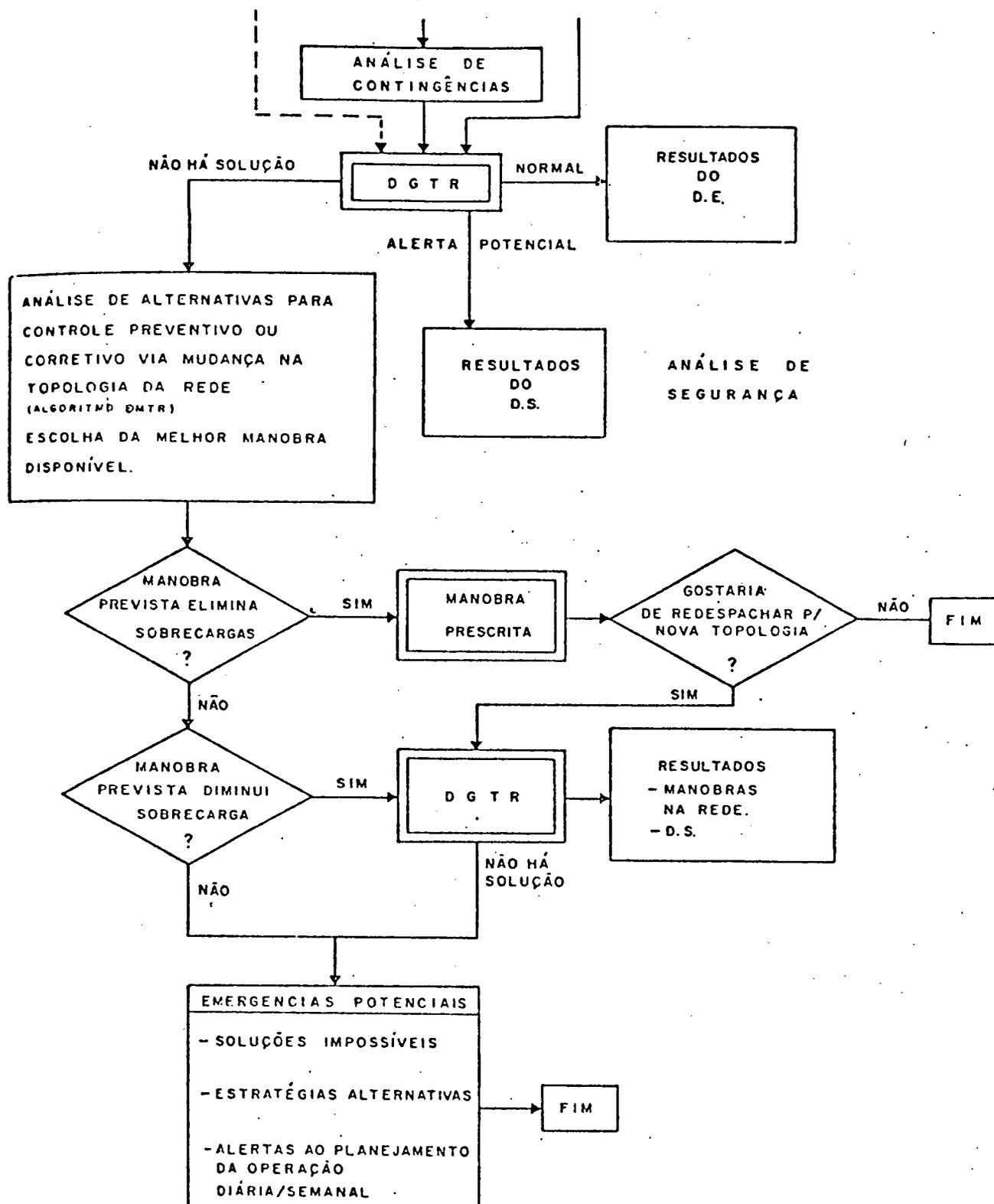


FIGURA 2.2 - Análise de Alternativas de Controle Através de Mudanças na Topologia da Rede na Cadeia de Tratamentos em Tempo Real

2.6 - Filosofia Adotada neste Trabalho

2.6.1 - Fluxo de Potência

Foi adotado como filosofia, neste trabalho, o tratamento das alternativas de controle de sobrecargas em linhas de transmissão, tanto na correção de sobrecargas reais (emergências reais) como no controle de sobrecargas potenciais determinadas na análise de segurança em tempo real, de uma forma bastante integrada, de maneira que fosse respeitada uma sequência de utilização dos recursos de controle ditada pela ótica operacional.

Para dar este tratamento, foi feita uma integração do programa Despacho de Geração em Tempo Real (DGTR) e do programa Determinação de Mudança Topológica da Rede (DMTR), ambos desenvolvidos no LABSPOT da UFSC, obtendo-se assim um programa onde o redespacho de potência ativa, a mudança da topologia da rede e o alívio de carga são as alternativas de controle de sobrecarga em linhas de transmissão e de transformadores.

A este programa integrado, deu-se o nome de Fluxo de Potência com Redespacho, Manobra e Corte de Carga (FLUP-RMC), uma vez que encontra-se nele a opção de despacho de segurança, com a alternativa de controle através da mudança da topologia da rede, além de despacho econômico.

2.6.2 - Sistemática de Seleção das Manobras

Para viabilizar a integração das alternativas de controle de sobrecarga, conforme descrito acima, o problema da redução do número de linhas chaveáveis a serem testadas, durante o cálculo da manobra ótima, foi resolvido através da aplicação de uma sistemática de seleção das linhas chaveáveis, bastante efetiva.

A sistemática de seleção desenvolvida, baseia-se na teoria dos grafos, nas leis de Kirchhoff e nas equações dos laços. Desta forma, são determinadas as correntes de laço para a rede elétrica, representada por seu grafo orientado, e são avaliados os efeitos da anulação do valor de algumas destas correntes sobre o valor da corrente da linha sobrecarregada.

Esta sistemática, baseou-se numa sugestão dada por UNGARETTI [28]. Examinando os resultados dos estudos realizados, ele verificou que para todos os casos sobre os sistemas estudados, os elementos que mais diminuía os níveis de sobrecargas, encontravam-se em algum laço fechado sobre os circuitos sobrecarregados. Então, sugeriu que com a rede representada por seu grafo orientado, poderia ser escolhida uma árvore, onde as ligações correspondessem às linhas chaveáveis do sistema e, assim, poderiam ser avaliados os valores de corrente dos ramos do grafo, eliminando-se cada uma das ligações.

A incorporação desta sistemática de seleção das manobras ao FLUP-RMC foi conseguida, conforme será visto neste trabalho, através do desenvolvimento do programa SELIC. Ao novo programa de fluxo de potência, resultante, deu-se o nome de

Fluxo de Potência com Redespacho, Manobra Selecionada e Corte de Carga (FLUP-RMSC).

2.6.3 - Critérios Adotados

A integração das alternativas de controle estudada contempla a utilização da mudança da topologia da rede, mesmo para os casos em que a solução pelo despacho de segurança é possível, desde que o alívio de carga tenha sido determinado como ação de controle a ser executada.

Quando a sobrecarga não é totalmente eliminada após o estudo da mudança da topologia da rede, recorre-se novamente ao despacho de segurança, para estudar a possibilidade de solução considerando, desta feita, que a linha indicada como manobra ótima está fora de operação.

C A P Í T U L O 3

FORMULAÇÃO DO MODELO (ASPECTOS CONCEITUAIS)

3.1 - Introdução

Este capítulo trata da formulação do modelo da rede elétrica e do modelo do Fluxo de Potência com Redespacho, Manobra Selecionada e Corte de Carga (FLUP-RMSC), destacando o despacho de geração em tempo real, especialmente o despacho de segurança, a seleção das linhas chaveáveis, a mudança na topologia da rede e o despacho de segurança após a mudança da topologia da rede.

3.2 - Formulação do Modelo da Rede

Na formulação proposta para o estudo do alívio de sobrecarga, a rede elétrica é representada por um modelo de fluxo de carga CC, o qual baseia-se no acoplamento entre a potência ativa (P) e o ângulo ($TETA$), e apresenta resultados tanto melhores quanto mais elevado o nível de tensão.

3.3 - Formulação do Modelo do FLUP - RMSC

Assim como a rede elétrica, o Fluxo de Potência com Redespacho, Manobra Selecionada e Corte de Carga é representado através do Fluxo de Carga CC, conforme será visto abaixo, com a formulação do modelo dos programas que o

compõem .

3.3.1 - Despacho de Geração em Tempo Real

Baseia-se no modelo do Fluxo de Carga CC. Este modelo permite que o despacho de geração apresente solução com uma precisão aceitável, para aplicações diversas, na determinação da distribuição dos fluxos de potência ativa em uma rede de transmissão [01].

3.3.2 - Seleção das Linhas Chaveáveis

Para a seleção das linhas chaveáveis do sistema, a rede é representada pelo seu grafo orientado e as linhas chaveáveis formam o conjunto de ligações do grafo e as demais linhas, inclusive a linha sobrecarregada, formam o conjunto de ramos do grafo. Portanto, tem-se que a árvore do grafo e a co-árvore associada, são convenientemente escolhidas para a solução do problema da seleção das linhas chaveáveis.

3.3.3 - Mudança da Topologia da Rede

Todo o desenvolvimento feito para a determinação de mudanças topológicas da rede baseou-se no modelo do Fluxo de Carga CC [28].

Na formulação proposta para descrever as alterações na topologia, a remoção de circuitos é simulada através da aplicação do Teorema da Compensação, o qual permite

avaliar o estado da rede após a alteração da admitância de um ramo qualquer, a partir das condições iniciais ou do ponto de operação básico da rede elétrica.

De uma maneira geral, o objetivo do método da compensação é refletir as alterações ocorridas na rede (matriz B) no termo independente (P), evitando assim nova formação e fatoração da matriz B .

Segundo o Teorema da Compensação, a alteração na admitância de um ramo da rede tem o mesmo efeito que a ligação de uma fonte de corrente de intensidade conveniente, entre os nós terminais da admitância deste ramo. Ou seja, o efeito da alteração de uma admitância da rede pode ser compensado por uma fonte de corrente apropriadamente sintonizada sobre o ramo correspondente.

C A P Í T U L O 4

FORMULAÇÃO MATEMÁTICA E TÉCNICAS DE SOLUÇÃO DO PROBLEMA

4.1 - Introdução

É apresentada neste capítulo, a formulação matemática geral e as técnicas de solução dos problemas que compõem o FLUP-RMSC, i.e.: do despacho de geração em tempo real, da seleção das linhas chaveáveis candidatas a manobra ótima e da determinação da melhor alternativa de mudança topológica da rede.

4.2 - Formulação Geral do Problema do DGTR

O DGTR pode ser sub-dividido em dois sub-problemas lineares. A formulação completa do DGTR, na versão implantada no LABSPOT, pode ser encontrada em Aguilar [01].

4.2.1 - 1^o Sub-problema - Despacho de Segurança - DS

O problema pode ser colocado como:

$$\begin{aligned} \text{mín } Z1 = & \sum_{i=1}^{NG} (PG_{MI}^{+} - PG_{MI}^{-} + PG_i^0 - PG_i^{\text{mín}} + \\ & + \sum_{j=1}^{NG} \alpha_j (PG_{MJ}^0 - PG_j - PC_j^{\text{rac}}) \end{aligned} \quad (4.1)$$

sujeito às seguintes restrições:

a) referente à conservação da distribuição das perdas do sistema:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i (PG_{MI}^+ - PG_{MI}^- - PC_{MI}) =$$

$$= \sum_{i=1}^N \lambda_i (PC_i^0 - PG_i^0 + PC_i^{rac}) \quad (4.2)$$

b) referente aos trânsitos de potência ativa nas linhas:

$$\underline{T}_{-M} - S \left(\underline{PG}_{-M}^+ - \underline{PG}_{-M}^- - \underline{PC}_{-M} \right) =$$

$$= S \cdot \left(\underline{2PG}^0 - \underline{PG}^{mín} - \underline{PC}^{rac} \right) - \underline{T}^{mín} \quad (4.3)$$

onde o sub-índice M indica variáveis modificadas, o traço inferior indica vetor e:

$$\underline{PG}_{-M}^- = \underline{PG}_{-M}^- - \underline{PG}_{-M}^{mín} \quad (4.4)$$

$$\underline{PG}_{-M}^+ = \underline{PG}_{-M}^+ - \underline{PG}_{-M}^0 \quad (4.5)$$

$$\underline{PC}_{-M} = \underline{PC}_{-M} - \underline{PC}_{-M}^{rac} \quad (4.6)$$

\underline{PG}_{-M}^- e \underline{PG}_{-M}^+ são definidos para contornar a dificuldade associada à descontinuidade da 1ª derivada de $\left| PG_i^0 - PG_i \right|$.

Tem-se ainda que:

NG = número de barras de geração;

NC = número de barras de cargas interruptíveis;

α_j = fator de racionamento da carga interruptível j;

$$PG_i = PG_i^0 + PG_i^+ - PG_i^- \quad (4.7)$$

onde PG_i^+ e PG_i^- são as potências das unidades geradoras fictícias equivalentes, definidas como componentes dos vetores PG^+ e PG^- , de modo tal que se PG_i^+ está disponível, então PG_i^- não está, e vice-versa.

PG^{rac} = vetor da potências ativas de cargas interruptíveis.
 S = matriz que relaciona as injeções de potência ativa nas barras aos trânsitos nos elementos da rede elétrica, de modo que:

$$S = \gamma \cdot A \cdot B^{-1} \quad (4.8)$$

Com: γ = matriz diagonal cujos elementos são as susceptâncias primitivas dos componentes da rede;

A = matriz de incidência dos elementos nas barras da rede;

B^{-1} = inversa da matriz de susceptâncias nodais, cujos elementos são:

$$B_{ik}^{-1} = -1/X_{ik} \quad (4.9)$$

$$e \quad B_{il}^{-1} = \sum_{k \in \Omega_l} 1/X_{ik} \quad (4.10)$$

onde ainda:

X_{ik} = reatância série do elemento ik ,

Ω_l = conjunto dos índices das barras vizinhas da barra l = barras adjacentes à barra l .

B é uma matriz singular, sendo necessário, para obter a sua inversa, eliminar uma linha e uma coluna de modo a torná-la não-singular. A barra eliminada é a Referência.

4.2.2 - 2^o Sub-problema - Despacho Econômico - DE

O DE é um problema linear bem mais simples, que pode ser definido como:

$$\min Z = \underline{b}^t \cdot \left(\underline{PG}_M + \underline{PG}^{mín} \right) \quad (4.11)$$

onde \underline{b}^t = vetor transposto dos custos marginais de produção; sujeito às restrições:

$$\sum_{i=1}^{NG} \lambda_i \cdot \underline{PG}_{MI} = \sum_{i=1}^{NG} \lambda_i \cdot \left(\underline{PG}_M^0 - \underline{PG}^{mín} \right) \quad (4.12)$$

$$\text{com: } \underline{PG}_{MI} = \underline{PG}_M - \underline{PG}^{mín} \quad (4.13)$$

e onde as restrições de geração, em termos das variáveis modificadas são:

$$0 < \underline{PG}_M < \underline{PG}^{máx} - \underline{PG}^{mín} \quad (4.14)$$

que ficam implícitas.

4.3 - Formulação Matemática do Problema da Seleção das Linhas Chaveáveis do Sistema

4.3.1 - Expressões das Correntes nas Linhas em Função das Correntes das Linhas Chaveáveis

No capítulo anterior, afirma-se que o sistema é representado pelo seu grafo orientado para a solução do problema

da seleção das linhas chaveáveis. Foi afirmado também, que a árvore e a co-árvore para o grafo orientado são convenientemente escolhidas, de forma que, no conjunto de ramos do grafo, esteja incluída a linha sobrecarregada, e que, no conjunto de ligações do grafo, estejam incluídas todas as linhas chaveáveis do sistema.

Tomando como exemplo um sistema elétrico com 6 barras e 9 linhas de transmissão, onde a linha 4 está sobrecarregada e as linhas 2, 3, 5 e 8, são linhas chaveáveis, teria o grafo orientado "G", mostrado na figura 4.1, e a árvore e a co-árvore, mostradas na figura 4.2.

Assim, o conjunto de elementos da árvore é :

$$M = \{ (1), (4), (6), (7), (9) \} \quad (4.15)$$

onde M é o conjunto dos ramos do grafo G, definidos pela árvore escolhida, e o elemento (4) é o ramo que representa a linha sobrecarregada.

O conjunto de elementos da co-árvore é :

$$L = \{ (2), (3), (5), (8) \} \quad (4.16)$$

onde L é o conjunto das ligações do grafo G, que pertencem à co-árvore associada à árvore M escolhida acima. Cada ligação representa uma linha chaveável do sistema, e corresponde a um laço fundamental que é definido sobre a árvore correspondente, como mostrado na figura 4.3.

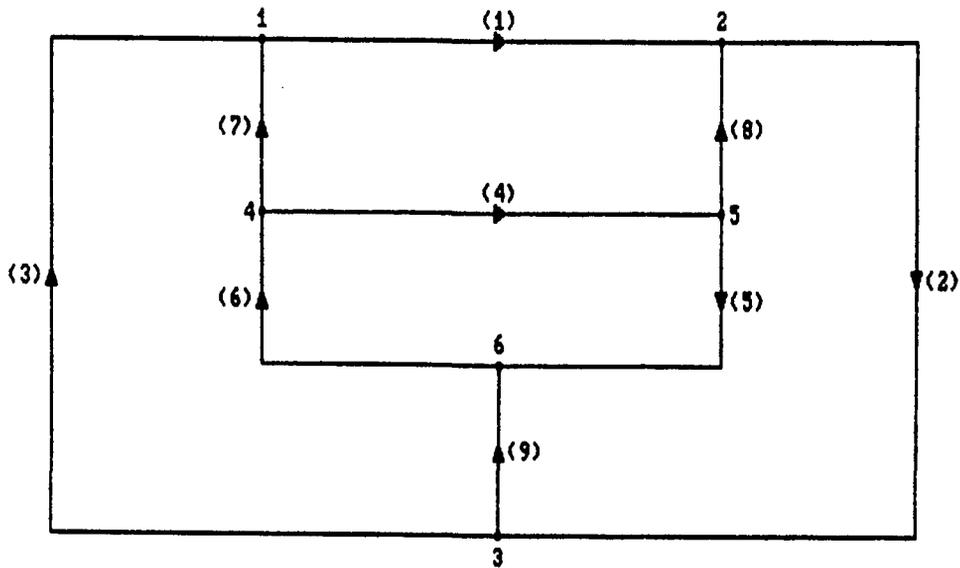


FIGURA 4.1 - Sistema Elétrico Representado pelo seu Grafo Orientado "G"

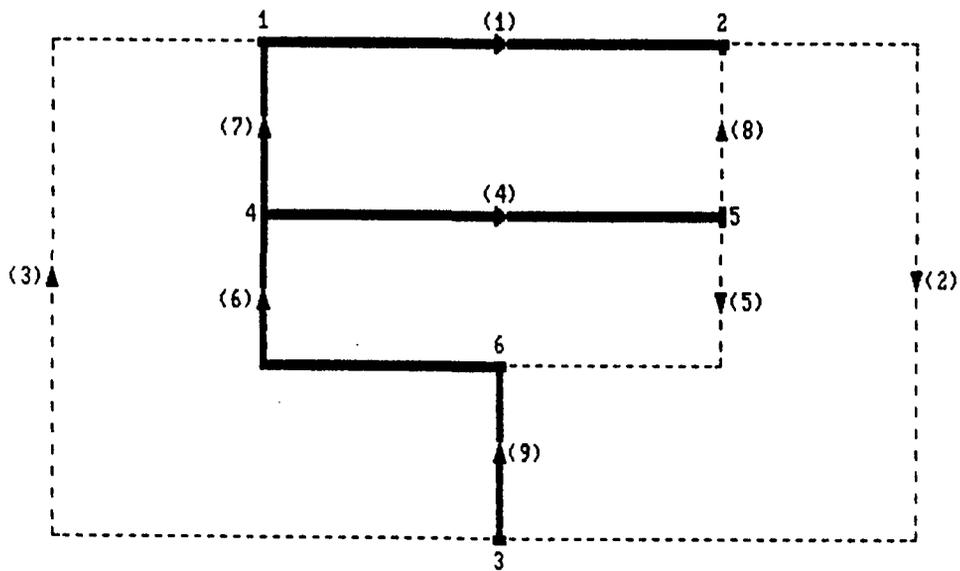


FIGURA 4.2 - Árvore e Co-árvore Escolhidas para o Grafo "G"

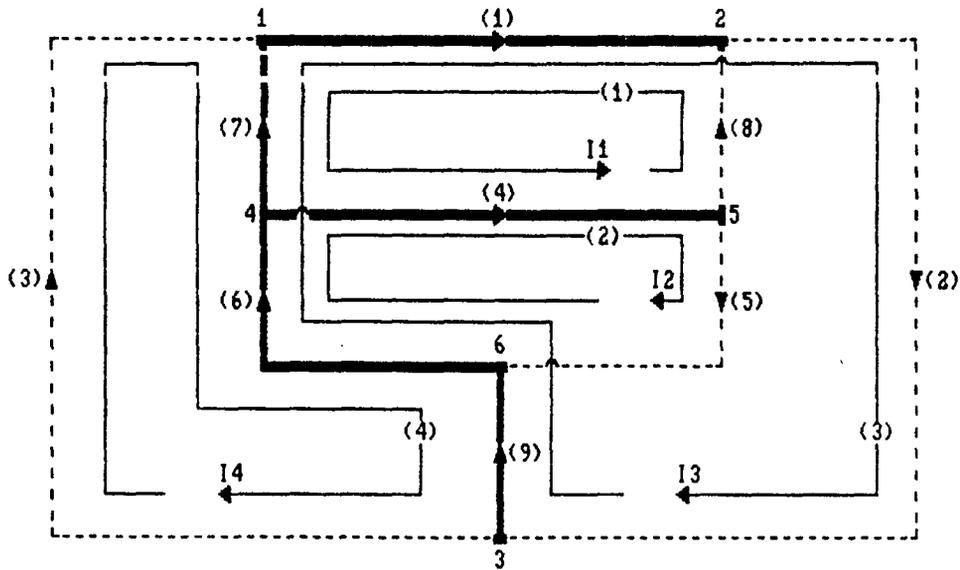


FIGURA 4.3 - Laços Fundamentais Associados às Ligações do Grafo "G"

Definidos os laços fundamentais, pode-se formar a matriz "C" de incidência dos laços.

Para o grafo tomado como exemplo, tem-se:

$$\begin{matrix}
 & & & & \leftarrow \text{LAÇOS} \\
 & & & & \text{FUNDAMENTAIS} \\
 \begin{matrix}
 \text{1} \\
 \text{2} \\
 \text{3} \\
 \text{4} \\
 \text{5} \\
 \text{6} \\
 \text{7} \\
 \text{8} \\
 \text{9}
 \end{matrix}
 & \text{C} = & \begin{matrix}
 \begin{matrix}
 \text{1} & \text{2} & \text{3} & \text{4}
 \end{matrix} \\
 \begin{matrix}
 -1 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 \\
 1 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 1 & -1 \\
 -1 & 0 & 1 & -1 \\
 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & -1
 \end{matrix}
 \end{matrix}
 \end{matrix}
 \tag{4.17}$$

$\xrightarrow{\text{ELEMENTOS}}$

de dimensão $NL \times NLCH$, onde NL é o número de linhas do sistema

(número de elementos do grafo) e NLCH é o número de linhas chaveáveis do sistema (NLCH = número de elementos do grafo - número de ramos da árvore).

A matriz C estabelece a relação entre as correntes nos elementos do grafo (J_{elemento}) e as correntes ($I_{\text{laço}}$) nas ligações L, ou nos laços associados, o que permite dizer que fornece a relação entre a corrente na linha sobrecarregada (4) e a corrente nas linhas chaveáveis do sistema, conforme pode ser visto na equação 4.18, a seguir:

$$\bar{J}_{\text{elemento}} = C \cdot \bar{I}_{\text{laço}} \quad (4.18)$$

onde, J e I são correntes complexas.

Deste modo, pode ser escrito:

J1
J2
J3
J4
J5
J6
J7
J8
J9

=

-1	0	1	0
0	0	1	0
0	0	0	1
1	1	0	0
0	1	0	0
0	1	1	-1
-1	0	1	-1
1	0	0	0
0	0	1	-1

x

I1
I2
I3
I4

(4.19)

de onde surgem as expressões de corrente dos elementos em função das correntes de laço, conforme abaixo:

$$\begin{aligned} J1 &= -I1 + I3; & J2 &= I3; & J3 &= I4; & J4 &= I1 + I2; & J5 &= I2; \\ J6 &= I2 + I3 - I4; & J7 &= -I1 + I3 - I4; & J8 &= I1; & J9 &= I3 - I4 \end{aligned} \quad (4.20)$$

Como as correntes nos ramos J1, J4, J6, J7 e J9 podem ser reescritas em função das correntes nas ligações J2, J3, J5 e J8, tem-se que:

$$\begin{aligned} J1 &= -J8 + J2; \quad J4 = J8 + J5; \quad J6 = J5 + J2 - J3; \\ J7 &= -J8 + J2 - J3; \quad J9 = J2 - J3 \end{aligned} \quad (4.21)$$

Deste modo, pode-se agora, verificar o que acontece com a corrente da linha sobrecarregada 4 (corrente do ramo (4)) eliminando cada uma das linhas chaveáveis do sistema (ligações do grafo).

Pela expressão

$$J4 = J5 + J8 \quad (4.22)$$

pode ser verificado explicitamente que a eliminação das linhas chaveáveis 2 e 3 não afetam a corrente da linha sobrecarregada 4. Já a eliminação das linhas chaveáveis 5 e 8 afetam, o que pode ocorrer no sentido de diminuir a sobrecarga na linha ou não, conforme será visto a seguir.

Admita-se que a manobra de retirada da ligação (5) é decidida. Se por acaso:

$$J4 > J4 \text{ máx}, \quad J8 > 0 \quad \text{e} \quad J5 = (-a) < 0$$

logo,

$$J4 = J8 + (-a) > J4 \text{ máx} .$$

Eliminando-se a ligação 5, ter-se-á:

$$J4' = J8 > J4$$

havendo, neste caso um aumento da sobrecarga.

Uma vez formulado o problema da determinação das expressões das correntes nos ramos em função das correntes nas ligações, resta formular o critério de seleção das linhas

chaveáveis (ligações de grafo).

4.3.2 - Formulação do Critério de Seleção das Linhas Chaveáveis

Para verificação da repercussão, sobre linhas sobrecarregadas, da manobra de retirada de linhas chaveáveis de operação, a seguinte sistemática é adotada:

1^o) Considerando conhecidas as correntes nas linhas do sistema (elementos do grafo), determinam-se as correntes dos laços fundamentais associados às ligações do grafo, fazendo:

$$\bar{I}_{\text{laço}} = \bar{J}_{\text{linhas chaveáveis}} \quad (4.23)$$

2^o) Através da equação

$$\bar{J}_{\text{ramos}} = C \times \bar{I}_{\text{laço}} \quad (4.24)$$

calcula-se a corrente inicial dos ramos (J_{ramo}^0), a partir das correntes dos laços fundamentais calculados no primeiro passo:

3^o) Novamente, através da equação (4.24)

$$\bar{J}_{\text{ramos}} = C \times \bar{I}_{\text{laço}}$$

Calcula-se, agora, a corrente resultante em cada ramo (J_{ramo}^i) considerando-se nulo o valor da corrente de cada um dos laços fundamentais "i", onde "i" = 1, 2 ..., NLGH e NLGH = número de laços fundamentais, que é igual ao número de linhas chaveáveis, o que corresponde à retirada da ligação correspondente ao laço "i".

4^o) Calculados os vetores:

J_{ramo}^{-0} = corrente nos ramos expressas em função das correntes dos laços fundamentais, e

J_{ramo}^{-i} = corrente nos ramos expressas em função das correntes dos laços fundamentais, considerando a corrente no laço "i" igual a zero ($i = 1, 2, \dots, NLGH$),

avalia-se o efeito da retirada da ligação correspondente ao laço "i" sobre os ramos de interesse "k" (linhas sobrecarregadas "k"), verificando se:

$J_{\text{ramo } k}^{-i} > J_{\text{ramo } k}^{-0}$ ou

$J_{\text{ramo } k}^{-i} = J_{\text{ramo } k}^{-0}$ ou

$J_{\text{ramo } k}^{-i} < J_{\text{ramo } k}^{-0}$

onde:

$J_{\text{ramo } k}^{-0}$ é a corrente expressa em função das correntes de laço, no ramo sobrecarregado "k", antes da retirada da ligação e

$J_{\text{ramo } k}^{-i}$ é a corrente expressa em função das correntes de laço, no ramo sobrecarregado "k", após a retirada da ligação correspondente "i".

5^o) Para o caso $J_{\text{ramo } k}^{-i} < J_{\text{ramo } k}^{-0}$ a linha correspondente à ligação do laço "i" é seleccionada como candidata a manobra ótima.

Para o caso $J_{\text{ramo } k}^{-i} = J_{\text{ramo } k}^{-0}$ a linha correspondente à ligação do laço "i" é incluída no conjunto das linhas que não afetam a corrente da linha sobrecarregada, mas que, pela formulação desenvolvida poderão ser seleccionadas, caso

não apareça pelo menos uma ligação do laço "l" que diminua a corrente da linha sobrecarregada k, em relação ao valor $J_{\text{ramo k}}^0$ quando então, são eliminadas.

Para o caso $J_{\text{ramo k}}^l > J_{\text{ramo k}}^0$ a linha correspondente à ligação "l" é desprezada da seleção.

Observa-se que, com esta sistemática, obtém-se como resultado da seleção, um dos conjuntos de linhas chaveáveis abaixo:

a) linhas que retiradas de operação provocam uma diminuição da corrente do ramo k

ou

b) linhas que não afetam a corrente do ramo K, após serem retiradas de operação (caso em que nenhuma linha chaveável diminui a corrente do ramo k) .

Este critério de seleção , que admite o resultado do tipo apresentado na letra "b" , visa preservar no processo de escolha da manobra ótima do programa DMTR, todas as linhas chaveáveis que, após a avaliação descrita se mostrarem insuficientes para alterar a corrente do ramo sobrecarregado.

Vale esclarecer que, conforme foi dito, este tipo de seleção só será feito caso nenhuma linha chaveável provoque a redução de corrente do ramo sobrecarregado.

A necessidade de preservar estas linhas, prende-se ao fato de que com um critério de seleção restrito ao uso do resultado do item "a" (somente as linhas que provocam uma diminuição da corrente do ramo K são seleccionadas), para essa condição, nenhuma linha seria seleccionada. Deste modo, a busca de uma solução através de ação de manobra sobre a rede terminaria

neste ponto e sem êxito. Entretanto através do processo de escolha da manobra ótima do programa DMTR, estas linhas podem ser testadas uma a uma e assim uma solução pode se verificar, mesmo que não seja muito efetiva no alívio da sobrecarga.

Em resumo, o critério de seleção adotado baseia-se, prioritariamente, na escolha de linhas chaveáveis que se mostram eficazes na redução da corrente no ramo sobrecarregado. Caso nenhuma linha se apresente eficaz, são selecionadas as linhas que, pelo menos, não aumentam a corrente do ramo sobrecarregado. Isto permite que, eventualmente, no processo de escolha da manobra ótima, passo subsequente do FLUP-RMC, uma destas linhas seja apontada como solução para o alívio da sobrecarga, uma vez que todas são avaliadas uma a uma.

4.3.3 -Casos Especiais do Critério de Seleção das Linhas Chaveáveis

Três aspectos importantes da formulação matemática desenvolvida para o problema da seleção de linhas chaveáveis são destacados a seguir.

4.3.3-a - Casos em que a Corrente do Ramo Sobrecarregado é Negativa

Quando a corrente do ramo sobrecarregado é negativa, é necessário que se dê um tratamento especial ao critério de seleção apresentado, como se verá.

Suponha-se que a corrente da linha (4) do sistema tomado como exemplo (figura 4.3), seja negativa :

$$I(4) < 0.$$

Como visto, a corrente neste ramo (4), expressa em função das correntes de laço, é igual ao somatório da corrente dos laços fundamentais 1 e 2 :

$$J_4 = I_1 + I_2 \quad \text{ou} \quad J_4 = J_8 + J_5$$

onde:

$I_1 = J_8 =$ corrente da ligação 8 (linha chaveável 8) e $I_2 = J_5 =$ corrente da ligação 5 (linha chaveável 5), conforme pode ser visualizado na figura 4.3.

Admita-se que a corrente da linha 8 seja positiva e que a da linha 5 seja negativa, ou seja:

$$J_8 = I_1 > 0 \quad \text{e} \quad J_5 = I_2 < 0$$

Segundo o critério de seleção formulado até aqui, ter-se-ia a seguinte situação:

- Com a retirada da linha chaveável 8 de operação:

$$\text{. antes da retirada:} \quad \overset{0}{J_4} = J_8 + J_5$$

$$\text{. após a retirada:} \quad \overset{1}{J_4} = J_8 + J_5 = 0 + J_5 < \overset{0}{J_4}$$

$$\text{Comparando o valor de } \overset{0}{J_4} \text{ e } \overset{1}{J_4} \text{ tem que:}$$

$$\overset{1}{J_4} < \overset{0}{J_4}$$

e portanto a linha 8, correspondente ao laço 1 é seleccionada como candidata a manobra ótima para o alívio de sobrecarga da linha 4.

Nota-se, que o critério é falho nesta situação, uma vez que sabe-se que a linha 8, de corrente de sinal positivo, ao ser retirada de operação, provoca um aumento da corrente da linha 4, sobrecarregada, que tem uma corrente

negativa. Portanto, a linha 8 deveria ser desprezada. Isto pode ser visualizado na figura 4.3 e simplificada abaixo, na figura 4.4.

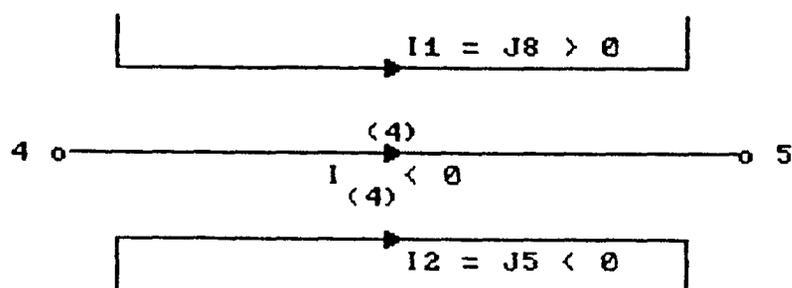


FIGURA 4.4

- Com a retirada da linha chaveável 5 de operação:

. antes da retirada: $J_4^0 = J_8 + J_5$

. após a retirada: $J_4^2 = J_8 + J_5 = J_8 + 0 > J_4^0$

Tem-se então: $J_4^2 > J_4^0$,

e portanto, a linha 5 correspondente ao laço 2 é desprezada da seleção.

Também, neste caso, nota-se que o critério é falho, pois sabe-se que a linha 5, de corrente de sinal negativo, ao ser retirada de operação, provoca uma diminuição da corrente da linha 4, sobrecarregada, que tem uma corrente negativa. Portanto, a linha 5 deveria ser selecionada. Pode ser visualizado este fato na figura 4.3 ou simplificada na figura 4.4.

Para solucionar este problema, adotou-se a seguinte sistemática:

" Sempre que a linha sobrecarregada tiver corrente negativa e

fizer parte do laço correspondente à linha chaveável a ser avaliada, terá o sinal da corrente invertido, só para efeito de verificação do aumento ou diminuição da sobrecarga com a retirada da linha chaveável de operação."

Obviamente, para linhas chaveáveis correspondentes a laços fundamentais que não passam pela linha sobrecarregada, isto não é necessário, pois a corrente da linha não é afetada.

4.3.3-b - Casos em que a Linha Sobrecarregada é Linha Chaveável

Quando a linha sobrecarregada é uma das linhas chaveáveis do sistema, ocorre que, pela formulação apresentada, a única linha seleccionada será ela própria. Isto ocorre porque a corrente da linha, após a sua retirada de operação, será nula, e considerando-se a sistemática descrita no item 4.3.3-a, será sempre menor do que a corrente verificada antes da manobra, seja ela positiva ou negativa.

As demais linhas chaveáveis não afetam o valor da corrente da linha sobrecarregada, neste caso, por tratar-se de uma ligação pela qual passa somente o laço correspondente a ela própria. Assim, não existe possibilidade de serem seleccionadas.

Porém, neste caso, é necessário que as demais linhas chaveáveis sejam seleccionadas, para que sejam avaliadas juntamente com a linha sobrecarregada no processo de escolha da manobra ótima do DMTR. Esta necessidade advém do fato de que com o critério formulado, a linha em sobrecarga é seleccionada e, na

realidade, as demais linhas são eliminadas sem terem o efeito de sua retirada de operação efetivamente avaliado.

Para solucionar este problema, sempre que a linha sobrecarregada for linha chaveável, é preciso que o critério de seleção formulado seja desprezado e todas as linhas chaveáveis sejam consideradas candidatas a manobra ótima.

4.3.3-c - Casos em que Existe Mais de uma Linha Sobrecarregada

Pelo critério formulado, foi visto que o resultado da seleção é:

.R1) O conjunto de linhas chaveáveis que diminuem a corrente de linha sobrecarregada;

ou

.R2) O conjunto de linhas chaveáveis que não afetam a corrente da linha sobrecarregada;

ou

.R3) O conjunto de todas as linhas chaveáveis (caso em que a linha sobrecarregada é chaveável).

Quando existe mais de uma linha sobrecarregada, adota-se como filosofia fazer todo o processo de seleção para cada uma das linhas, e acumular no resultado, todas as linhas chaveáveis selecionadas, fazendo a eliminação das que porventura sejam repetidas.

Isto garante uma simplicidade maior para o critério de seleção. Poder-se-ia pensar em adotar como filosofia um critério de seleção de forma global, para todas as linhas sobrecarregadas, quando se teria um dos seguintes resultados

possíveis:

1^o) O conjunto de linhas chaveáveis que diminuem a corrente de todas as linhas sobrecarregadas;

ou

2^o) O conjunto de linhas chaveáveis que diminuem a corrente de pelo menos uma das linhas sobrecarregadas;

ou

3^o) O conjunto de linhas chaveáveis que não afetam a corrente de nenhuma das linhas sobrecarregadas;

ou

4^o) O conjunto de todas as linhas chaveáveis (caso em que uma ou mais linhas sobrecarregadas são linhas chaveáveis).

No 2^o resultado apresentado, pode ocorrer o fato de uma das linhas sobrecarregadas, não ter sua corrente diminuída com nenhuma das linhas chaveáveis. Caso ela fosse avaliada individualmente, vê-se que o resultado, seria o descrito em R2, no item anterior, onde a relação se daria para o conjunto de linhas chaveáveis que não afetam a corrente da linha sobrecarregada em questão. Portanto, existe, neste caso, considerando-se um critério de relação de forma global, o risco da solução da sobrecarga de uma determinada linha ficar fora do resultado da seleção.

Analisando os resultados possíveis, conclui-se que, para resolver o problema levantado, relativo ao 2^o resultado descrito, poder-se-ia simplesmente juntar o 2^o e 3^o resultado num único, quando se teria:

- O conjunto de linhas chaveáveis que diminuem a

corrente de pelo menos uma das linhas sobrecarregadas e de linhas chaveáveis que não afetam a corrente das demais linhas sobrecarregadas.

Entretanto, para obter-se este tipo de resultado dentro de um critério de seleção de forma global, é necessário criar rotinas de cálculo que se apresentam complicadas. Por outro lado, com o processo de seleção feito individualmente para cada linha sobrecarregada, os mesmos resultados são garantidos, requerendo rotinas de cálculos mais simples.

Por este motivo, adotou-se como filosofia neste trabalho, fazer todo o processo de seleção individualmente para cada uma das linhas sobrecarregadas.

4.3.4 - Simplificação do Método de Seleção das Linhas Chaveáveis

No item 4.3.1 demonstra-se como as correntes nas linhas do sistema podem ser expressas em função das correntes das linhas chaveáveis e, assim, apresentam-se as expressões de correntes nos ramos, em função das correntes dos laços fundamentais.

Em seguida, mostra-se como a corrente dos ramos muda com a eliminação das linhas chaveáveis, o que é verificado anulando-se o valor das correntes destas linhas.

Nota-se que o método formulado para a seleção das linhas chaveáveis depende do conhecimento prévio das correntes das linhas chaveáveis. O valor dessas correntes pode ser obtido, no caso do estudo de sobrecargas reais, do resultado da estimação

de estado e, no caso do estudo de sobrecargas potenciais, do resultado da análise de contingência. Entretanto, isto significará uma demanda maior de cálculo computacional, uma vez que normalmente, estas funções não fornecem explicitamente o valor das correntes na rede.

Conclui-se, portanto, que apesar da seleção das linhas chaveáveis para redução do número de manobras candidatas a serem avaliadas no programa FLUP-RMSC, ser benéfica, sob o ponto de vista do esforço computacional, ela traz consigo este inconveniente.

Visando a eliminação do inconveniente descrito acima, é introduzida uma simplificação no método de seleção das linhas chaveáveis, de forma a dispensar a utilização do valor previamente conhecido das correntes que fluem nestas linhas.

Para maior facilidade, toma-se novamente, como exemplo, a rede apresentada na figura 4.3, cujo conjunto de expressões das correntes nos elementos em função das correntes de laço, escritos em (4.20), é retomado abaixo:

$$\begin{aligned}
 J_1 &= -I_1 + I_3; & J_2 &= I_3; & J_3 &= I_4; & J_4 &= I_1 + I_2; \\
 J_5 &= I_2; & J_6 &= I_2 + I_3 - I_4; & J_7 &= -I_1 + I_3 - I_4; & & (4.20) \\
 J_8 &= I_1; & J_9 &= I_3 - I_4
 \end{aligned}$$

As correntes de laço, como foi visto, são as correntes que fluem nas linhas chaveáveis do sistema: I_3 , I_4 , I_2 e I_1 , respectivamente nas linhas 2, 3, 5 e 8.

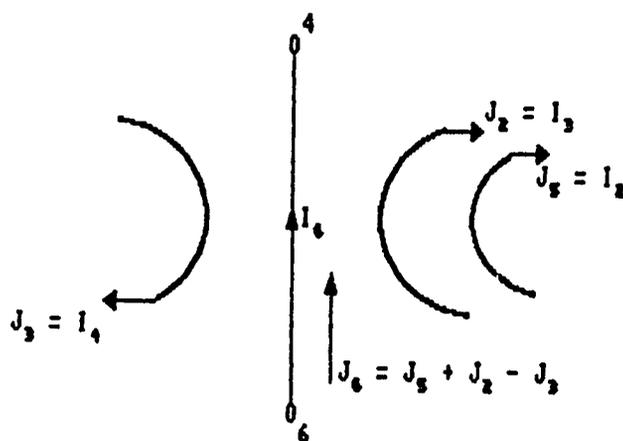
Para avaliação do efeito do chaveamento dessas linhas, são utilizadas as equações (4.21), abaixo:

$$\begin{aligned} J_1 &= -J_8 + J_2; & J_4 &= J_8 + J_5; & J_6 &= J_5 + J_2 - J_3 \\ J_7 &= -J_8 + J_2 - J_3; & J_9 &= J_2 - J_3 \end{aligned} \quad (4.21)$$

Para avaliação da redução da sobrecarga, por exemplo, no ramo 6, pelo critério de seleção formulado, é utilizada a expressão:

$$J_6 = J_5 + J_2 - J_3,$$

que corresponde à parte do grafo G, mostrado abaixo:



onde: I = corrente nas linhas

J = corrente nos ramos em função das correntes de laço

Para efeito de demonstração, admite-se inicialmente, que J_6 pode diferir de I_6 e inclusive, assumir valor nulo. Ao final, será justificado este procedimento.

Supondo uma avaliação da redução da sobrecarga em função da retirada da linha chaveável 5, as seguintes situações poderiam ocorrer:

- 1^a) $I_6 > 0$ e $J_6 > 0$, com $J_5 > 0$ ou $J_5 < 0$;
- 2^a) $I_6 > 0$ e $J_6 < 0$, com $J_5 > 0$ ou $J_5 < 0$;

- 3^a) $16 > 0$ e $J6 = 0$, com $J5 > 0$ ou $J5 < 0$;
- 4^a) $16 < 0$ e $J6 > 0$, com $J5 > 0$ ou $J5 < 0$;
- 5^a) $16 < 0$ e $J6 < 0$, com $J5 > 0$ ou $J5 < 0$;
- 6^a) $16 < 0$ e $J6 = 0$, com $J5 > 0$ ou $J5 < 0$.

1^a situação :

a) $16 > 0$ e $J6 > 0$, com $J5 > 0$:

-antes da retirada da linha 5, tem-se:

$$J6^0 = J5 + J2 - J3 > 0$$

-após a retirada da linha 5, tem-se:

$$J6 = J2 - J3$$

-resultando: $J6 < J6^0$ e seleção da linha 5.

b) $16 > 0$ e $J6 > 0$, com $J5 < 0$:

$$\text{-antes: } J6^0 = J5 + J2 - J3 > 0$$

$$\text{-depois: } J6 = J2 - J3$$

-resultando: $J6 > J6^0$ e eliminação da linha 5.

2^a situação:

a) $16 > 0$ e $J6 < 0$, com $J5 > 0$:

$$\text{-antes: } J6^0 = J5 + J2 - J3 < 0$$

$$\text{-depois: } J6 = J2 - J3$$

-resultando: $J6 < J6^0$ e seleção da linha 5.

b) $16 > 0$ e $J6 < 0$, com $J5 < 0$:

$$\text{-antes: } J6^0 = J5 + J2 - J3 < 0$$

$$\text{-depois: } J6 = J2 - J3$$

-resultando: $J6 > J6^0$ e eliminação da linha 5.

3^a situação:

a) $I_6 > 0$ e $J_6 = 0$, com $J_5 > 0$:

-antes: $J_6^0 = J_5 + J_2 - J_3 = 0$

-depois $J_6 = J_2 - J_3$

-resultando: $J_6 < J_6^0$ e seleção da linha 5.

b) $I_6 > 0$ e $J_6 = 0$, com $J_5 < 0$

-antes: $J_6 = J_5 + J_2 - J_3 = 0$

-depois: $J_6 = J_2 - J_3$

-resultando: $J_6^0 > J_6$ e eliminação da linha 5.

4^a situação:

a) $I_6 < 0$ e $J_6 > 0$, com $J_5 > 0$:

-antes: $J_6^0 = J_5 + J_2 - J_3 > 0$;

-depois: $J_6 = J_2 - J_3$;

-resultando: $J_6 < J_6^0$

Neste caso, $I_6 < 0$, conforme visto no item 4.3.3-a, para efeito da verificação do aumento ou diminuição da corrente no ramo sobrecarregado, faz-se:

$$J_6' = -J_6^0 < 0 \quad (\text{note a troca do sinal})$$

Tem-se, então, como resultado:

$J_6 > J_6'$ e eliminação da linha 5.

b) $I_6 < 0$ e $J_6 > 0$, com $J_5 < 0$:

-antes: $J_6^0 = J_5 + J_2 - J_3 > 0$

-depois: $J_6 = J_2 - J_3$

-resultando: $J_6 > J_6^0$, $J_6 < J_6'$ e seleção da linha 5.

5^a situação:

a) $I_6 < 0$ e $J_6 < 0$, com $J_5 > 0$:

-antes: $J_6^0 = J_5 + J_2 - J_3 < 0$;

-depois: $J_6 = J_2 - J_3$

-resultando: $J_6 < J_6^0$, $J_6 > J_6^0$ e eliminação da
linha 5.

b) $I_6 < 0$ e $J_6 < 0$, com $J_5 < 0$:

-antes: $J_6^0 = J_5 + J_2 - J_3 < 0$

-depois: $J_6 = J_2 - J_3$

-resultando: $J_6 > J_6^0$, $J_6 < J_6^0$ e seleção da
linha 5.

6^a situação:

a) $I_6 < 0$ e $J_6 = 0$, com $J_5 > 0$:

-antes: $J_6^0 = J_5 + J_2 - J_3 = 0$;

-depois: $J_6 = J_2 - J_3$;

-resultando: $J_6 < J_6^0$, $J_6 > J_6^0$ e eliminação da
linha 5.

b) $I_6 < 0$ e $J_6 = 0$, com $J_5 < 0$:

-antes: $J_6^0 = J_5 + J_2 - J_3 = 0$;

-depois: $J_6 = J_2 - J_3$;

-resultando: $J_6 > J_6^0$, $J_6 < J_6^0$ e seleção da
linha 5.

Observando o processo de seleção de cada uma das situações, percebe-se que ele baseia-se unicamente na expressão

$$J_6 = J_5 + J_2 - J_3$$

e que:

- a única parcela da expressão, que é de interesse é "J5", correspondente à linha chaveável 5;
- as demais parcelas da expressão não são importantes e funcionam como uma constante;
- os valores das correntes I6, J6 e J5 não precisam ser conhecidos;
- todo o processo, baseia-se, apenas, no sentido das correntes I6, J6 e J5;
- J6 é apenas uma referência para comparação e o seu valor e sentido não precisam necessariamente coincidir com I6.

Baseado nestas observações, podem ser feitas as seguintes simplificações no método de seleção formulado:

A) O modelo da rede pode ser reduzido, dispensando-se a representação, no grafo orientado, das correntes de carga e de geração, e portanto, do nó de referência, conforme passa a ser demonstrado.

Seja o sistema de 6 barras e 9 linhas de transmissão /transformadores, mostrado na figura 4.5. O grafo orientado deste sistema é o mostrado na figura 4.6.

Os elementos 10, 11 e 12 do grafo, representam a geração e as cargas do sistema da figura 4.5.

A partir da figura 4.7, pode-se expressar todas as correntes dos ramos em função das correntes nas ligações J2, J3, J5, J8, J11 e J12.

Para uma sobrecarga na linha 6, a expressão de interesse é :

$$J6 = J5 + J2 - J3 + J12 + J11$$

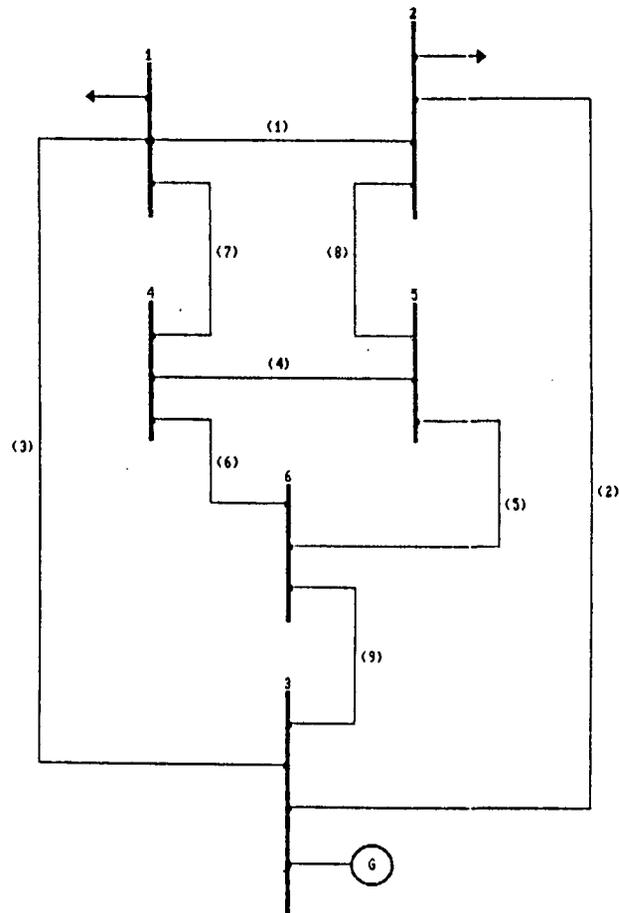


FIGURA 4.5 - Sistema Exemplo de 6 Barras e 9 Linhas de Transmissão / Transformadores

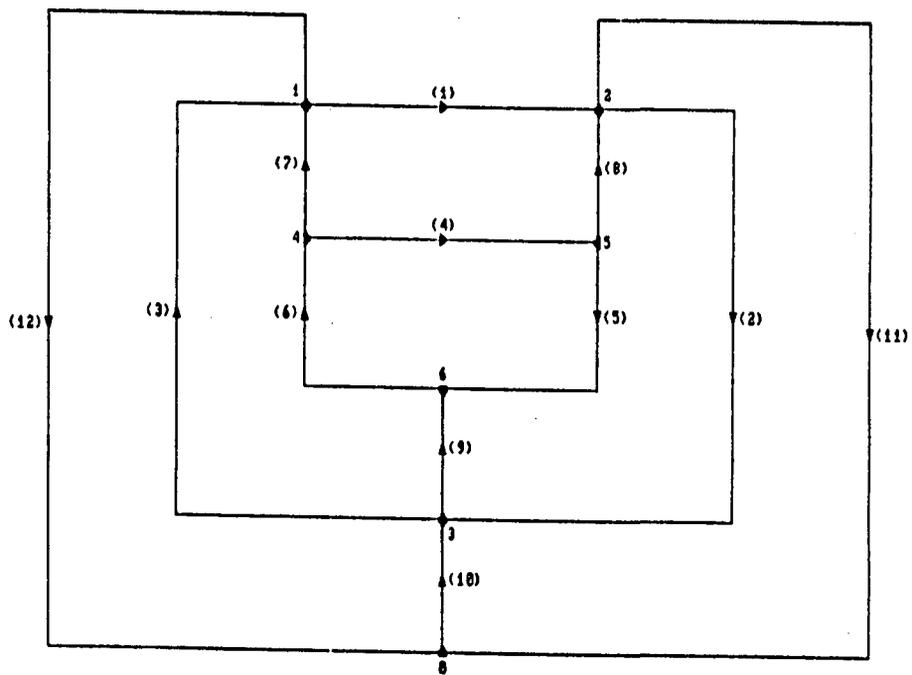


FIGURA 4.6 - Grafo Orientado do Sistema Apresentado na Figura 4.5

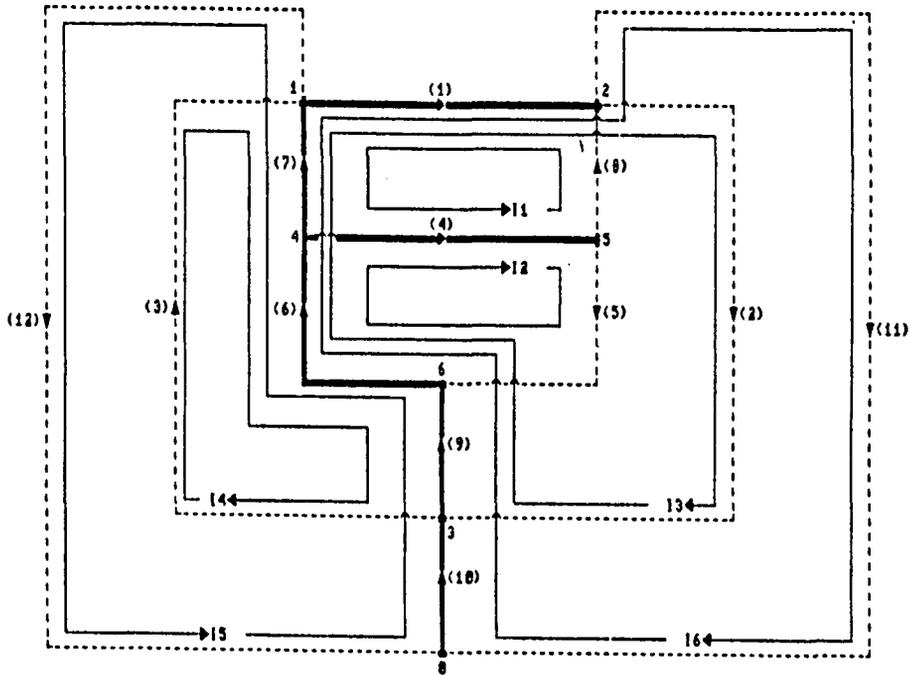


FIGURA 4.7 - Árvore, Co-árvore e Laços Fundamentais do Grafo da Figura 4.6

Foi visto, que o importante desta expressão, quando se quer avaliar o chaveamento da linha 5, é apenas o sentido da corrente da ligação J5, sendo que as demais parcelas funcionam como uma constante que não interferem no método.

Como os elementos 10, 11 e 12 do grafo, não são linhas chaveáveis e tampouco linhas sujeitas a sobrecarga, a eliminação dos mesmos não afetará o estudo da sobrecarga da linha 6, e por extensão, das demais linhas do sistema.

Considerando que o valor da corrente J6 é apenas uma referência para comparação antes e após a retirada de linha chaveável, conclui-se que é possível serem eliminados os elementos 10, 11 e 12 do grafo e por consequência o nó de referência 0. Aliás este é um procedimento bem conhecido dos

estudos de fluxo de carga.

Procedendo desta forma, não obtém-se mais os valores exatos das correntes dos ramos, quando calculados em função das correntes das ligações, uma vez que as expressões utilizadas estão truncadas.

O grafo resultante, após a eliminação dos elementos 10, 11 e 12 e do nó de referência, é o apresentado na figura 4.1 e utilizado como exemplo ao longo deste capítulo.

B) Às correntes das linhas do sistema pode ser atribuído, segundo o seu sentido real, valor igual a +1 e -1, quando coincidente com a orientação no grafo ou não, respectivamente.

Isto pode ser comprovado atribuindo-se, nas seis situações apresentadas no exemplo dado anteriormente, o valor +1 para as correntes I₆, J₆ e J₅ ditas maior que zero e -1 para as ditas menor que zero.

4.4 - Formulação Geral do Problema do DMTR

A formulação completa do DMTR, na versão implantada no LABSPOT, pode ser encontrada em Ungaretti [28].

O problema de escolha de mudança de topologia para alívio de sobrecarga é decomposto em dois níveis.

4.4.1 - Problema do 1^o Nível - Determinação da Melhor Alternativa de Mudança na Topologia da Rede

Sejam:

$\{N\}$ - Conjunto de manobras possíveis;

$\{L\}$ - Subconjunto de manobras de elementos da rede que podem ser chaveados;

m_i - Manobra i simples ($i = 1, 2, \dots, |\{L\}|$);

$\{m\}$ - Subconjunto de manobras múltiplas possíveis;

G - Grafo da rede, tal que $G = (X, U)$;

X - Conjunto dos nós do grafo G ($|X| = \text{constante} = n = \text{número de barras da rede}$) e

U - Conjunto dos ramos do grafo G ($|U| = NL = \text{número de elementos da rede}$).

O Sub-problema de 1^o Nível pode ser enunciado

como:

Encontrar a manobra $m \in \{N\}$, ou o subconjunto de manobras $\{m\} \subseteq \{N\}$, que mais alivia $\{m\}$ as sobrecargas da rede, usando como critério a seguinte funcional:

$$ZY = \sum_{i=1}^{NLSC} SC_i = \sum_{i=1}^{NLSC} \left| \bar{T}_i - |T_i| \right| \quad (4.25)$$

onde:

\bar{T}_i = Trânsito máximo no ramo i ;

$|T_i|$ = Valor absoluto do trânsito no ramo i ;

NLSC = Número de elementos sobrecarregados pertencentes a $\{LSC\}$ que é o conjunto de todos os elementos que apresentam sobrecarga numa dada situação operacional.

A expressão (4.25) pode ser reescrita usando o Teorema da Compensação, de modo que o sub-problema pode ser formulado como:

$$\min ZY = \left(\left\| \sum_{l=1}^{NLSC} \frac{1}{T_l} - T^0 \right\| - \sum_{l=1}^{NLSC} \left\| \sum_{i=1}^{|N|} R_{li} \cdot I_{cl} \cdot \delta_l \right\| \right) \quad (4.26)$$

sujeita a:

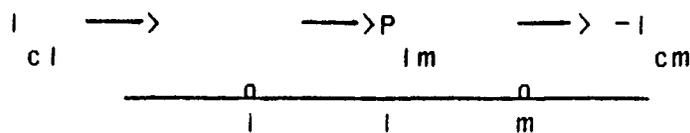
$$\left\| \sum_{i=1}^{|N|} R_{li} \cdot I_{cl} \cdot \delta_l \right\| < \left\| \frac{1}{T_l} - T^0 \right\|, \quad \{ (\forall i), /i=1, \dots, NLSC \} \text{ e} \\ \{ (\forall i), /i=1, \dots, |N| \} \quad (4.27)$$

onde:

δ_l é uma variável bivalente, com valor "1" se a manobra "m" é ativada e "0" se a manobra "m" é desativada:

R_{li} = elemento da matriz R, que relaciona as injeções de compensação com os fluxos nos elementos de G:

I_{cl} = injeção de compensação que representa o efeito da manobra realizada, conforme indicado a seguir:



$$I_{cl} = I_{cl} = -I_{cm} = P_{lm}, \text{ com } l = (i, m) \quad (4.28)$$

T^0 = trânsitos no caso básico.

4.4.2 - Problema do 2^o Nível - Determinação dos Desvios e Alívios de Carga para a Nova Topologia Resultante

Se ZY não zera para m ou (m) , então o problema que passa a ser resolvido é o Despacho de Segurança do programa DGTR apresentado no item 4.2.

C A P Í T U L O 5

DESCRIÇÃO DO PROGRAMA DESENVOLVIDO

5.1 - Introdução

Este capítulo destina-se à apresentação do programa desenvolvido para a solução do FLUP-RMSC, na sua forma descrita nos capítulos anteriores, passando pela preparação dos dados de entrada necessários e pela descrição do algoritmo e fluxograma.

5.2 - Programa Desenvolvido para Solução do Problema do DGTR e do DMTR

A descrição completa dos programas DGTR e DMTR pode ser encontrada nas referências [01] e [28] respectivamente. Para efeito de aproveitamento nos programas FLUP-RMC e FLUP-RMSC eles foram utilizados na versão implantada no LABSPOT da UFSC, com algumas compatibilizações de dados de entrada e sub-rotinas.

5.3 - Programa Desenvolvido para a Solução do Problema do FLUP-RMC

5.3.1 - Introdução

O programa FLUP - RMC consiste, basicamente, na integração de forma conveniente, do programa de despacho de

geração em tempo real - DGTR e do programa de determinação da mudança topológica da rede - DMTR.

Este programa foi desenvolvido utilizando-se a linguagem FROTRAN e já implantado num micro-computador PC - XT, ocupando 504.083 bytes de memória.

5.3.2 - Entrada de Dados

Os dados necessários para a utilização do FLUP - RMC são os mesmos necessários para a utilização do DGTR e do DMTR.

Para a parte do DGTR, são necessários os resultados da estimação de estado e da análise de segurança, que fornecerão os seguintes dados:

- a topologia da rede em tempo real;
- os valores de injeção de potência ativa nas barras e os módulos das tensões;
- as perdas diferenciais associadas a cada barra do sistema;
- a lista das sobrecargas reais dos equipamentos de transporte;
- a lista das sobrecargas potenciais associadas a uma lista de contingências selecionadas na análise de segurança.

Como para este trabalho os dados não são disponíveis, os mesmos foram simulados através de um fluxo de carga AC, desacoplado rápido, utilizando-se o programa FLGMR desenvolvido na UFSC.

Além dos dados simulados, são necessários ainda, os seguintes dados para a Implantação do FLUP - RMC:

- a lista de cargas interruptíveis e os racionamentos pré - estabelecidos;
- as características elétricas e as características técnico-econômicas dos diferentes equipamentos de produção e transporte;
- o conjunto de linhas chaveáveis do sistema.

Para a parte do DMTR, é preciso que se tenha, além de alguns dos dados descritos acima, os resultados do DGTR relativos às sobrecargas reais ou potenciais, com solução impossível ou com solução envolvendo corte de carga, que representam o ponto de operação do caso base a ser estudado no DMTR. Estes resultados fornecerão :

- a topologia da rede elétrica (B);
- os ângulos de fase das tensões de barra (TETA);
- o conjunto de elementos sobrecarregados;
- o valor do nível de sobrecarga do sistema (ZY).

5.3.3 - Algoritmo do Programa FLUP - RMC

O problema do FLUP - RMC é subdividido em três sub-problemas : o despacho de segurança, o despacho econômico e a

determinação de mudança topológica da rede. Cada um destes subproblemas possui um objetivo distinto.

A definição dos subproblemas de despacho de segurança e do despacho econômico se dá logo após o teste de detecção de sobrecarga, através da função de análise de contingências, podendo cada um ser resolvido independentemente do outro.

A definição do sub-problema da determinação da mudança topológica da rede se dá após os seguintes testes dentro do DGTR:

- verificação da existência de solução possível, mas envolvendo corte da carga, e
- verificação de solução impossível.

Dentro do sub-problema da determinação da mudança topológica da rede (DMTR), há novo teste para definição do subproblema de despacho de segurança, que consiste na verificação da existência de solução possível, mas sem eliminação da sobrecarga. Após este teste, o problema de despacho é resolvido para a configuração da rede obtida após a retirada da linha chaveável ótima e com o novo valor de sobrecarga resultante.

5.3.4 - Fluxograma Completo do Programa FLUP-RMC

O fluxograma completo do programa FLUP-RMC pode ser visto na figura 5.1.

A descrição de cada um dos passos do programa pode ser encontrada nas referências [01] e [28], respectivamente, para o programa de despacho de geração em tempo real - DGTR e de

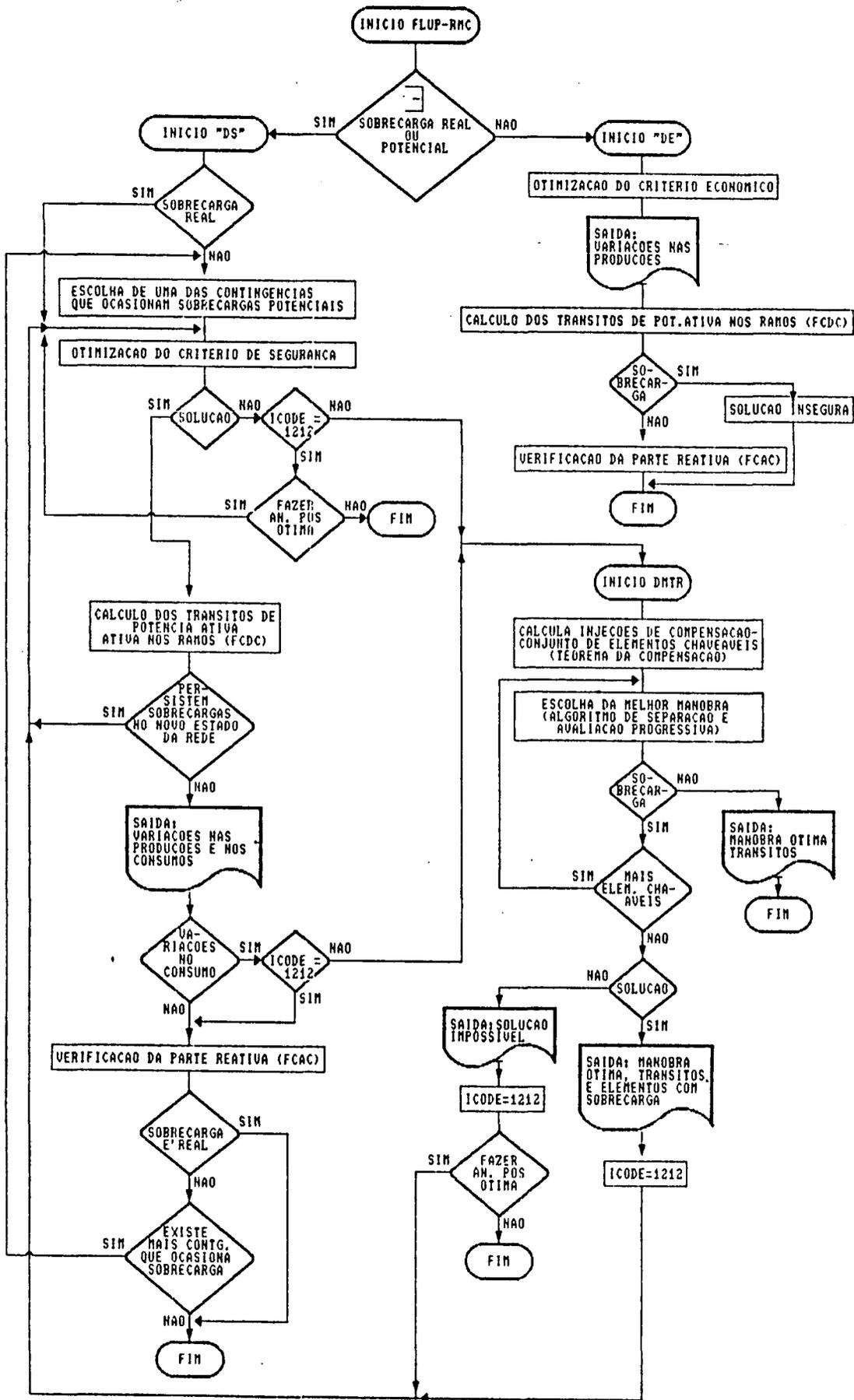


FIGURA 5.1 - Fluxograma Completo do Programa FLUP-RMC

determinação de mudança topológica da rede - DMTR, cabendo aqui um comentário do teste de ICODE = 1212.

O objetivo deste passo é saber se a configuração da rede no momento do teste é resultante de uma mudança topológica da rede, definida pelo DMTR.

Observa-se que quando a saída da DMTR é solução com sobrecarga, a nova configuração da rede recebe o código ICODE = 1212 e retorna para uma tentativa de solução pelo despacho de segurança.

No despacho de segurança, não existindo solução ou tendo solução envolvendo corte de carga, o teste "ICODE = 1212" é feito para evitar o retorno ao DMTR.

Pelo fluxograma, pode-se verificar que a opção pela análise pós-ótima do DS do DGTR só poderá ser feita após a tentativa de solução através do DMTR e quando este não apontar uma solução ou esta apenas aliviar a sobrecarga.

5.4 - Programa Desenvolvido para Seleção das Linhas Chaveáveis (SELIC)

5.4.1 - Introdução

Neste item é apresentado o programa desenvolvido para resolver o problema da seleção das linhas chaveáveis (SELIC) para redução do número de casos a serem avaliados pelo programa DMTR, de forma que o FLUP - RMC tenha um melhor desempenho computacional, tornando-o mais compatível com

os demais programas da cadeia de tratamentos em tempo real.

O programa consiste na determinação dos laços fundamentais da rede elétrica, da montagem da matriz de incidência dos laços e da aplicação do critério de seleção das linhas chaveáveis.

5.4.2 - Entrada de Dados

Para utilização do SELIC é necessário se dispor dos seguintes dados de entrada:

- topologia da rede elétrica;
- ângulo de fase das tensões de barra (TETA);
- conjunto de elementos sobrecarregados;
- conjunto de linhas chaveáveis.

Cabe destacar que o número de elementos do conjunto de linhas chaveáveis da entrada de dados, deve ser igual ao número de ligações do grafo que representa a rede elétrica, ou seja :

$$NL1 = l = e - n + 1$$

onde:

- NL1 = número de linhas chaveáveis;
- l = número de ligações do grafo;
- e = número de elementos do grafo;
- n = número de nós do grafo.

Caso o número de linhas chaveáveis na rede elétrica seja menor que NL1 , há necessidade de adotar-se outras linhas da rede como sendo chaveáveis, apenas para completar o total "NL1" e viabilizar a utilização do programa. Caso o número

seja maior, há necessidade de separar em dois grupos com NL1 linhas e processar a seleção em duas etapas.

5.4.3 - Algoritmo do Programa SELIC

O algoritmo no qual se baseia o programa SELIC consiste nos seguintes passos:

- PASSO I - Preparar os dados necessários para utilização no programa:
- dados gerais do sistema:
 - . número de barras;
 - . número de linhas;
 - . número de linhas chaveáveis;
 - . número de linhas com sobrecarga;
 - dados de barra:
 - . número das barras;
 - . ângulo de fase das tensões de barra.
 - dados relativos às linhas do sistema:
 - . número das linhas;
 - . número das barras inicial e final;
 - . número das linhas chaveáveis;
 - . número das linhas com sobrecarga.
- PASSO II - Determinar o sentido dos fluxos de corrente nas linhas e atribuir valor unitário ou nulo para os mesmos:
- . calcular a abertura angular da linha;

- . fazer o valor da corrente igual a +1 se o sentido do fluxo for coincidente com a orientação dada ao elemento do grafo correspondente a esta linha, e igual a -1 se o sentido for contrário;
- . se a abertura angular de uma linha for nula, atribuir valor igual a zero à corrente da mesma.

PASSO III - Determinar os laços fundamentais do grafo:

- . aplicar o algoritmo de busca aplicado ao problema de determinação de trajetórias:
 - a) fazer J2 igual ao número da barra final e J5 ao da barra inicial da linha chaveável NLCH;
 - b) testar se BI ou BF (barra inicial ou final) de uma linha do conjunto de linhas não chaveáveis do sistema é igual a J2:
 - b.1) se for igual, verificar se a barra oposta da linha é igual a J5 (barra inicial da linha chaveável NLCH)
- . se for, com esta linha está se completando o laço fundamental (correspondente à linha chaveável NLCH), que é, então, armazenado: retorna-se,

então, à letra "a" para iniciar a busca de novo laço fundamental, com nova linha chaveável NLCH, caso ainda exista alguma:

. se não for, armazenar a linha no conjunto de linhas do laço provisórias "LLAPR" e refazer o teste "b" para nova linha do conjunto de linhas não chaveáveis do sistema, caso ainda exista alguma, caso contrário, passar para letra "c":

b.2) se não for, é porque a linha não faz parte do laço fundamental correspondente à linha chaveável NLCH, e então, repete-se o teste "b" para nova linha do conjunto de linhas não chaveáveis do sistema, caso ainda exista alguma ; caso contrário, passar para a letra "c":

c) não se completando o laço fundamental, correspondente à linha NLCH, a partir de J2, após o teste feito em "b", fazer J2 igual ao número da barra oposta de uma linha do conjunto de linhas do laço provisórios "LLAPR" e retornar ao passo "b".

PASSO IV - Montar a matriz de incidência dos laços "C" :

- . testar se a orientação das linhas dos laços fundamentais no grafo, coincide com a orientação da linha chaveável que determina cada laço e atribuir ao elemento da matriz "C" valor igual a +1 se houver coincidência, e -1 se não houver;
- . fazer o elemento da matriz "C" correspondente à linha chaveável igual a +1.

PASSO V - Calcular as correntes das linhas em função das correntes de laço (CLOOP):

- . multiplicar a matriz de incidência de laço (C) pelo vetor de corrente (+1, -1 e 0) das linhas chaveáveis (CRGH): $\overline{CLOOP} = C \times \overline{CRGH}$

PASSO VI - Iniciar a seleção das linhas chaveáveis para a linha com sobrecarga "KK":

PASSO VII - Calcular as correntes das linhas em função das correntes de laço (CLOOP1), considerando a corrente da linha do conjunto de linhas chaveáveis

a ser testada "K", igual a zero:

- . multiplicar a matriz de incidência de laço (C) pelo vetor de corrente das linhas chaveáveis modificado (CRCH'):

$$\overline{\text{GLOOP1}} = C \times \overline{\text{CRCH}'}$$

PASSO VIII - Aplicar algoritmo de seleção de linhas chaveáveis à linha sob teste "K" :

- . verificar para a linha com sobrecarga "KK" se :

a) $\text{GLOOP1(KK)} < \text{GLOOP(KK)}$

se for, selecionar a linha K e retornar ao passo VII, tomando outra linha chaveável "K" do conjunto de linhas chaveáveis, caso ainda exista linha a testar;

se não for, fazer testes da letra "b" a seguir:

b) $\text{GLOOP1(KK)} = \text{GLOOP(KK)}$

se for, armazenar a linha K para posteriormente selecioná-la, caso nenhuma linha seja selecionada no teste descrito na letra "a";

se não for, eliminar a linha "K" da seleção e retornar ao passo VII, tomando outra linha chaveável "K" do conjunto de linhas chaveáveis, caso

ainda exista linha a testar:

- . verificar a ocorrência, durante o processo de seleção, de caso em que a linha chaveável a ser testada "K" é igual a linha com sobrecarga "KK"; neste caso selecionar automaticamente a linha "K" e retornar ao passo VII, tomando outra linha chaveável "K" do conjunto de linhas chaveáveis, caso ainda exista linha a testar:

- . verificar a ocorrência, durante o processo de seleção de caso em que a corrente (GRAMO) da linha sobrecarregada, pertencente ao laço correspondente à linha chaveável "K" é negativa; neste caso, trocar o sinal da corrente da linha sobrecarregada expressa em função das correntes de laço (CLOOP (KK)), fazer os teste "a" e "b" e retornar com o sinal original.

PASSO IX - Ordenar as linhas chaveáveis selecionadas:

- . indicar número de linhas selecionadas NL2;
- . indicar o número das linhas selecionadas NLSEL;
- . retornar ao passo VI, caso ainda exista linha com sobrecarga a ser testada.

PASSO X - Preparar o conjunto de linhas selecionadas para utilização no programa DMTR:

- . fazer NL1 = NL2;
- . fazer NLGH = NLSEL.

5.4.4 - Fluxograma Completo do Programa SELIC

Apresenta-se, na figura 5.2, o fluxograma completo do programa desenvolvido para a solução do problema de seleção das linhas chaveáveis do sistema, segundo a filosofia descrita neste trabalho.

5.5 - Programa Desenvolvido para Solução do Problema do FLUP - RMC com a Rotina SELIC (FLUP - RMSC)

5.5.1 - Introdução

O programa FLUP - RMSC consiste de uma modificação no programa FLUP - RMC, apresentado no item 5.3, de forma que antes da parte referente à determinação da mudança da topologia da rede (programa da rotina DMTR), é inserida a seleção de linhas chaveáveis, proporcionada pelo SELIC, descrito no item 5.4. O FLUP-RMSC foi também implantado num micro-computador PC-XT e o código executável ocupa 541.126 bytes de memória.

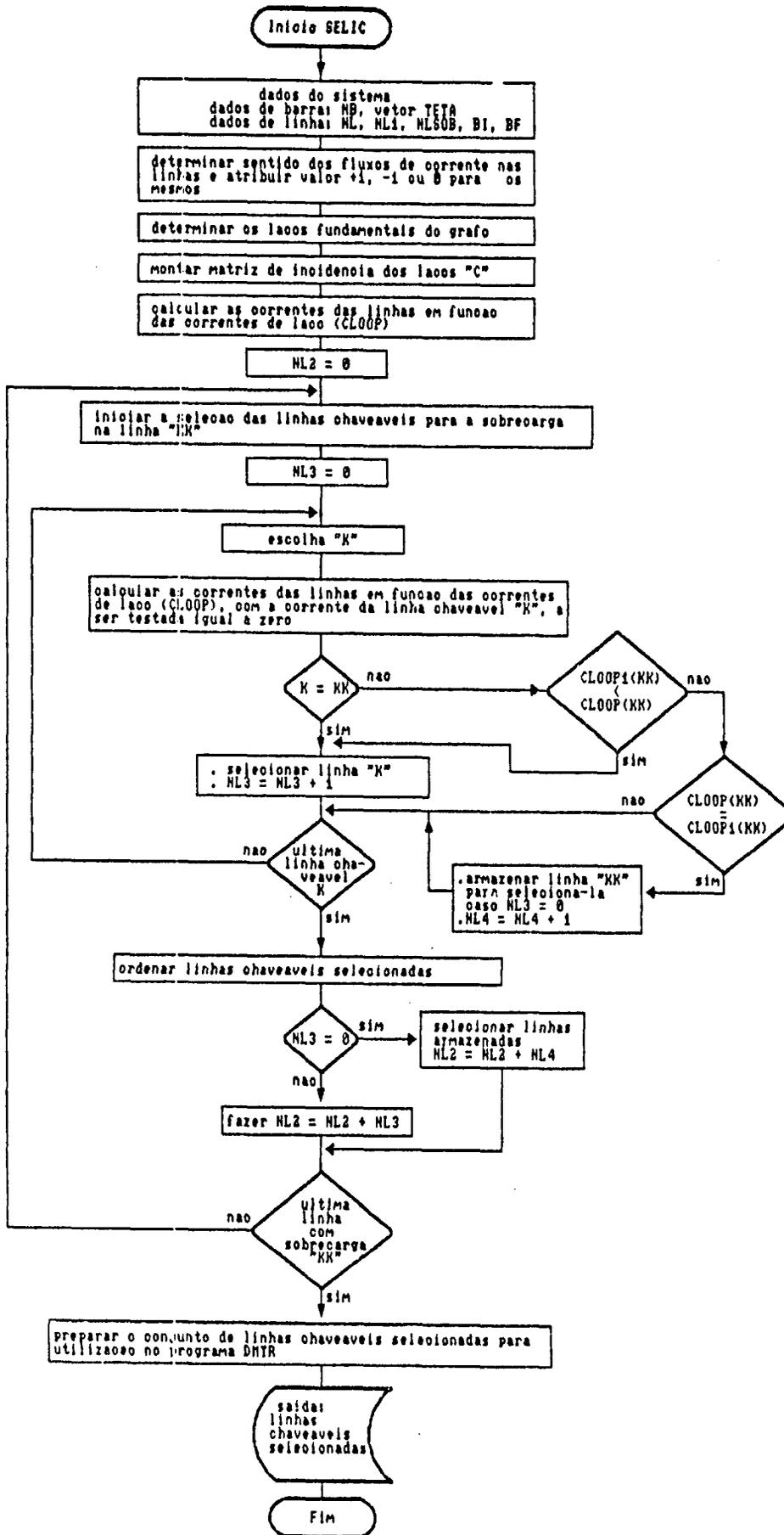


FIGURA 5.2 - Fluxograma Completo do Programa SELIC

5.5.2 - Entrada de Dados

Os dados necessários para a utilização do programa FLUP - RMSC são os mesmos necessários para o FLUP - RMC, apenas, com a ressalva de que o número de elementos do conjunto de linhas chaveáveis deve ser igual ao número de ligações do grafo que representa a rede elétrica.

5.5.3 - Algoritmo do Programa FLUP-RMSC

O programa do FLUP - RMSC é subdividido em quatro subprogramas: o despacho de segurança, o despacho econômico, a seleção das linhas chaveáveis e a determinação de mudança topológica da rede.

Todos os comentários feitos acerca do algoritmo do FLUP - RMC permanecem válidos, devendo ser acrescido a estes, a questão da definição do subproblema da seleção das linhas chaveáveis dentro do FLUP - RMSC.

A definição do subproblema da seleção se dá logo após os seguintes testes, realizados dentro do DGTR:

- verificação da existência de solução possível, mas envolvendo corte de carga, e
- verificação de solução impossível.

Uma vez definido o problema da seleção das linhas chaveáveis, o mesmo é resolvido através da rotina SELIC e em seguida, automaticamente é resolvido o problema da determinação da mudança topológica da rede, e deste ponto em diante, o algoritmo não muda em relação ao FLUP - RMC.

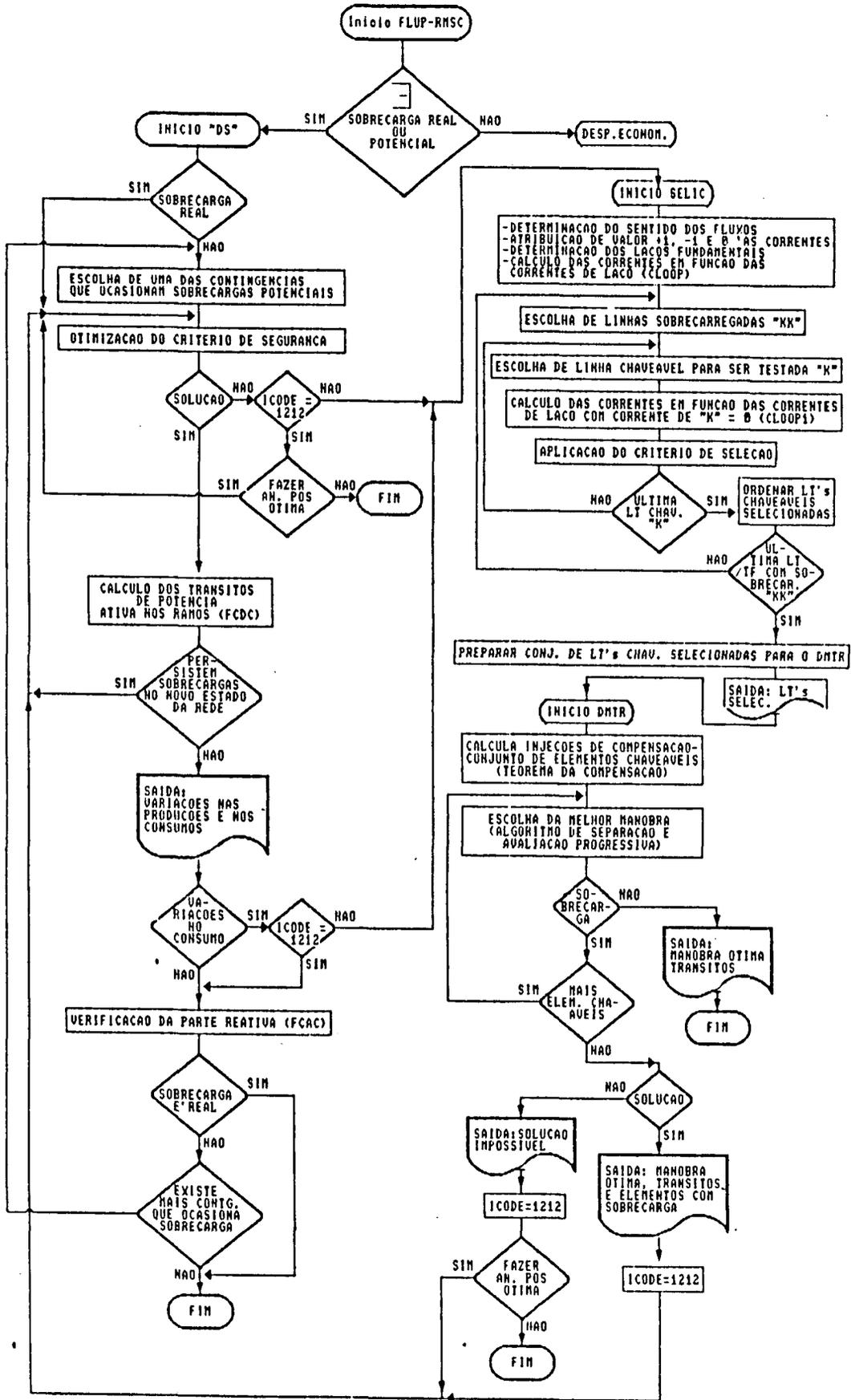


FIGURA 5.3 - Fluxograma Completo do Programa FLUP-RMSC

5.5.4 - Fluxograma Completo do Programa FLUP - RMSC

Apresenta-se na figura 5.3, para maior clareza, o fluxograma completo do FLUP - RMSC.

C A P Í T U L O 6

RESULTADOS

6.1 - Introdução

Nos capítulos anteriores mostrou-se que o programa FLUP - RMSC é uma integração dos programas de despacho de geração em tempo real - DGTR, de seleção de linhas chaveáveis - SELIC e de determinação da mudança topológica da rede - DMTR, que visa proporcionar redespacho de potência ativa, manobra na rede e corte de carga como recursos de controle de sobrecarga, considerando uma priorização na utilização dos mesmos.

Os programas DGTR e DMTR já foram devidamente testados, tanto com sistemas exemplo, como com sistemas reais, nos trabalhos apresentados nas referências [01] e [28], respectivamente.

Neste capítulo, portanto, serão apresentados os resultados obtidos com a aplicação do programa SELIC, desenvolvido neste trabalho. Para efeito de comparação dos resultados obtidos, também serão apresentados os resultados da utilização do DMTR, sem aplicação do SELIC para os mesmos casos testados usando o SELIC.

6.2 - Aplicação do Programa SELIC ao Sistema AEP - 14

6.2.1 - Dados e Comentários

O sistema utilizado é uma modificação do sistema AEP - 14, apresentado na figura 6.1. Vale ressaltar que este sistema é o mesmo utilizado nas referências [10] e [28].

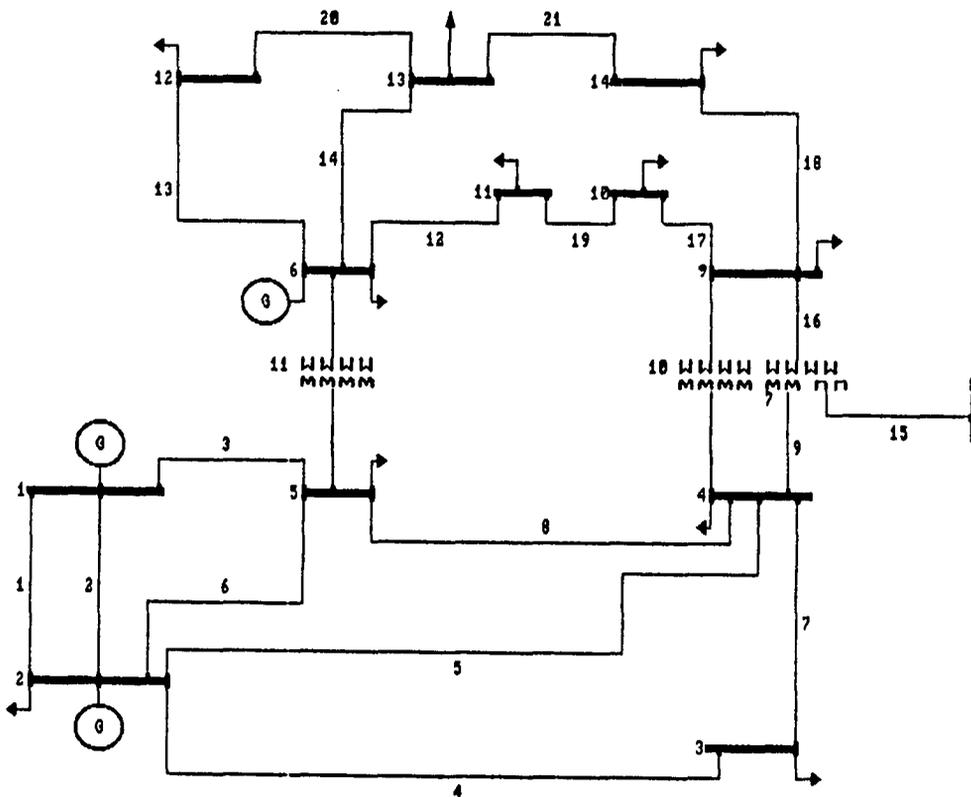


FIGURA 6.1 - Sistema AEP - 14 Barras Modificado

Trata-se de um sistema de 14 barras, de 21 circuitos, sendo 18 linhas de transmissão, 3 transformadores, e de 3 geradores.

Para desenvolver esta aplicação, parte-se das condições operativas do sistema obtidas através de um fluxo

de carga AC e apresentados nas tabelas 6.1 e 6.2, respectivamente.

CIRCUITO No.	DA BARRA	PARA BARRA	RESISTENCIA (p.u)	REATANCIA (p.u.)	SUSCEPTANCIA (p.u.)	CAPACIDADE (mW)	TAPS (p.u)
1	1	2	0,01940	0,05920	0,0528	130	
2	1	2	0,01940	0,05920	0,0528	130	
3	1	5	0,05403	0,22304	0,0492	130	
4	2	3	0,04699	0,19797	0,0438	130	
5	2	4	0,05811	0,17632	0,0374	65	
6	2	5	0,05695	0,17388	0,0340	65	
7	3	4	0,06701	0,17103	0,0346	70	
8	4	5	0,01335	0,04211	0,0128	90	
9	4	7	0,0	0,20912	0,0	65	0,978
10	4	9	0,0	0,55612	0,0	32	0,969
11	5	6	0,0	0,25202	0,0	65	0,965
12	6	11	0,09498	0,19890	0,0	32	
13	6	12	0,12291	0,25581	0,0	32	
14	6	13	0,06615	0,13037	0,0	32	
15	7	8	0,0	0,17615	0,0	65	
16	7	9	0,0	0,11001	0,0	65	
17	9	10	0,03181	0,08450	0,0	32	
18	9	14	0,12711	0,27038	0,0	32	
19	10	11	0,08205	0,19207	0,0	16	
20	12	13	0,22092	0,19988	0,0	16	
21	13	14	0,17093	0,34802	0,0	16	

TABELA 6.1 - Parâmetros dos Elementos do Sistema AEP - 14 Barras

As linhas chaveáveis do sistema estão mostradas na tabela 6.3. Como foi visto nos capítulos anteriores, a árvore e a co-árvore escolhidas para o grafo orientado que representa o sistema, devem ser compatíveis com estas linhas.

Na figura 6.2 apresenta-se a árvore e co-árvore para o grafo orientado que representa o sistema AEP, onde as

Barra No	Tipo	GERACAO		CARGA		Capacitor ou Reator (MVAR)
		Ativa (MW)	Reativa (MVAR)	Ativa (MW)	Reativa (MVAR)	
1	REF	147,00		0,0	0,0	0,0
2	PV	26,00		22,00	12,70	0,0
3	PQ	0,0	0,0	98,90	19,00	0,0
4	PQ	0,0	0,0	50,20	-3,90	0,0
5	PQ	0,0	0,0	8,00	1,60	0,0
6	PV	100,00		11,00	7,50	0,0
7	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	PQ	0,0	0,0	31,00	16,60	19,00
10	PQ	0,0	0,0	9,40	5,80	0,0
11	PQ	0,0	0,0	3,70	1,80	0,0
12	PQ	0,0	0,0	6,40	1,60	0,0
13	PQ	0,0	0,0	14,20	5,80	0,0
14	PQ	0,0	0,0	15,60	5,00	0,0

TABELA 6.2 - Condições de Operação do Sistema AEP - 14 Barras

NUMERO	CIRCUITO NUMERO	DA BARRA NUMERO	PARA BARRA NUMERO
1	1	1	2
2	3	1	5
3	7	3	4
4	8	4	5
5	10	4	9
6	17	9	10
7	18	9	14
8	20	12	13

TABELA 6.3 - Circuitos Chaveáveis Para o Sistema AEP - 14

ligações (que formam a co-árvore) foram convenientemente escolhidas para o caso particular deste exemplo, de forma que fossem as linhas chaveáveis do sistema.

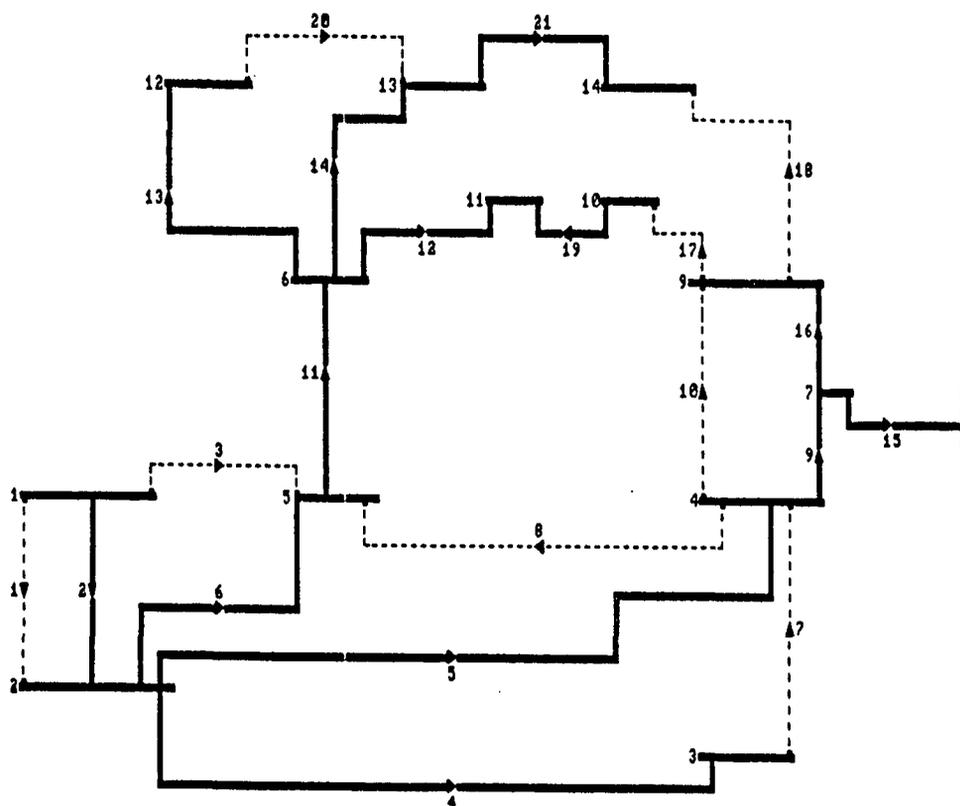


FIGURA 6.2 - Árvore e Co-árvore Escolhidas do Grafo do Sistema AEP - 14

O primeiro caso de sobrecarga que se obtém no sistema é a sobrecarga real dos circuitos 19 e 21. Constatase que partindo da condição operativa apresentada na tabela 6.2 e dos limites de transmissão ou carregamento apresentados na tabela 6.1, o sistema já apresenta estas sobrecargas reais.

Para tornar possível a exploração do desempenho

do programa SELIC em outras situações, que não a de sobrecarga real inicialmente obtidas, considera-se este caso igual ao "caso 1" e propõem-se as alterações indicados abaixo nos limites das linhas 19 e 21, obtendo com isso a seguinte relação de casos:

CASO No.	LIMITE DE TRANSMISSÃO (MW)		No. DOS CIRCUITOS COM SOBRECARGA
	LT 19	LT 21	
1	16	16	19 e 21
2	32	16	21
3	16	32	19

Com os casos 2 e 3, obtém-se sobrecarga real nos circuitos 21 e 19, respectivamente.

Com os limites de transmissão iguais a 32 MW nas linhas 19 e 21, não se verifica mais sobrecarga real no sistema.

Deste modo, utilizando-se este limite modificado para as linhas 19 e 21 foi feita a análise de contingência no sistema, através de um programa de fluxo de carga desacoplado rápido (FLGMR do LABSPOT do UFSC). Desta análise, obteve-se a lista de casos em que foram detectadas sobrecargas potenciais no sistema. Esta lista corresponde aos casos 4 a 13 apresentados na tabela 6.4, que inclui também, os casos 1 a 13, relativos às sobrecargas reais.

Na tabela 6.5, a seguir, serão apresentados os ângulos de fase das tensões de barra para cada caso constante da tabela 6.4, sendo que para os casos 1, 2 e 3 os ângulos são os obtidos da condição operativa inicial do sistema e estão agrupados na tabela.

CASO NÚMERO	LIMITE DE TRANSM. (MW)		NUM. DO CIRC. EM CONTINGENCIA	NUM. DOS CIRC. COM SOBRECARGA
	LT 19	LT 21		
1	16	16	-	19, 21
2	32	16	-	21
3	16	32	-	19
4	32	32	4	7, 8
5	32	32	8	5, 12, 14, 19
6	32	32	11	12, 14, 19
7	32	32	12	14
8	32	32	13	14
9	32	32	14	12, 20
10	32	32	17	14
11	32	32	19	14
12	32	32	20	14
13	32	32	21	12, 19

TABELA 6.4 - Casos Utilizados para Aplicação do Algoritmo de Seleção de Linhas Chaveáveis

ANGULOS DE FASE DAS TENSOES DE BARRA (GRAUS)												
BARRA NUM.	CASO	1,2,3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2		-1.95	-1.71	-2.30	-1.93	-1.97	-1.95	-1.96	-1.96	-1.97	-1.95	-1.96
3		-9.07	-17.81	-11.24	-8.92	-9.18	-9.07	-9.10	-9.12	-9.16	-9.07	-9.13
4		-5.52	-8.12	-9.28	-5.26	-5.72	-5.53	-5.58	-5.62	-5.69	-5.53	-5.63
5		-3.96	-5.75	-1.36	-4.14	-3.82	-3.95	-3.92	-3.89	-3.84	-3.95	-3.88
6		-0.81	-2.88	-0.37	+5.57	+1.65	-0.70	-0.07	+0.46	+1.32	-0.76	+0.60
7		-6.58	-9.04	-9.20	-4.66	-8.00	-6.65	-7.01	-7.32	-7.81	-6.61	-7.39
8		-6.58	-9.04	-9.20	-4.66	-8.00	-6.65	-7.01	-7.32	-7.81	-6.61	-7.39
9		-7.14	-9.52	-9.16	-4.34	-9.20	-7.23	-7.76	-8.21	-8.92	-7.18	-8.32
10		-6.46	-8.79	-8.05	-3.03	-9.84	-6.52	-6.84	-2.07	-9.38	-6.49	-7.18
11		-3.89	-6.09	-4.48	+0.99	-10.25	-3.87	-3.72	-1.03	+0.89	-3.88	-3.57
12		-2.41	-4.51	-2.16	+3.68	-0.31	-4.26	-4.39	-1.32	-0.59	-1.70	-0.39
13		-2.93	-5.04	-2.83	+2.94	-1.10	-3.53	-7.03	-1.99	-1.35	-3.18	-0.43
14		-6.66	-8.92	-7.75	-2.52	-7.02	-6.97	-0.80	-6.85	-6.97	-6.79	-10.74

TABELA 6.5 - Ângulos de Fase das Tensões de Barra do Sistema para Cada Caso Utilizado para Aplicação do SELIC

LACO NUM.	LINHA CHAVEAVEL CORRESPONDENTE	LINHAS QUE FORMAM O LACO
1	1	1,2
2	3	2,3,6
3	7	4,5,7
4	8	5,6,8
5	10	9,10,16
6	17	5,6,9,11,12,16 17,19
7	18	5,6,9,11,14,16,18,21
8	20	13,14,20

TABELA 6.6 - Laços Fundamentais do Grafo da Figura 6.2

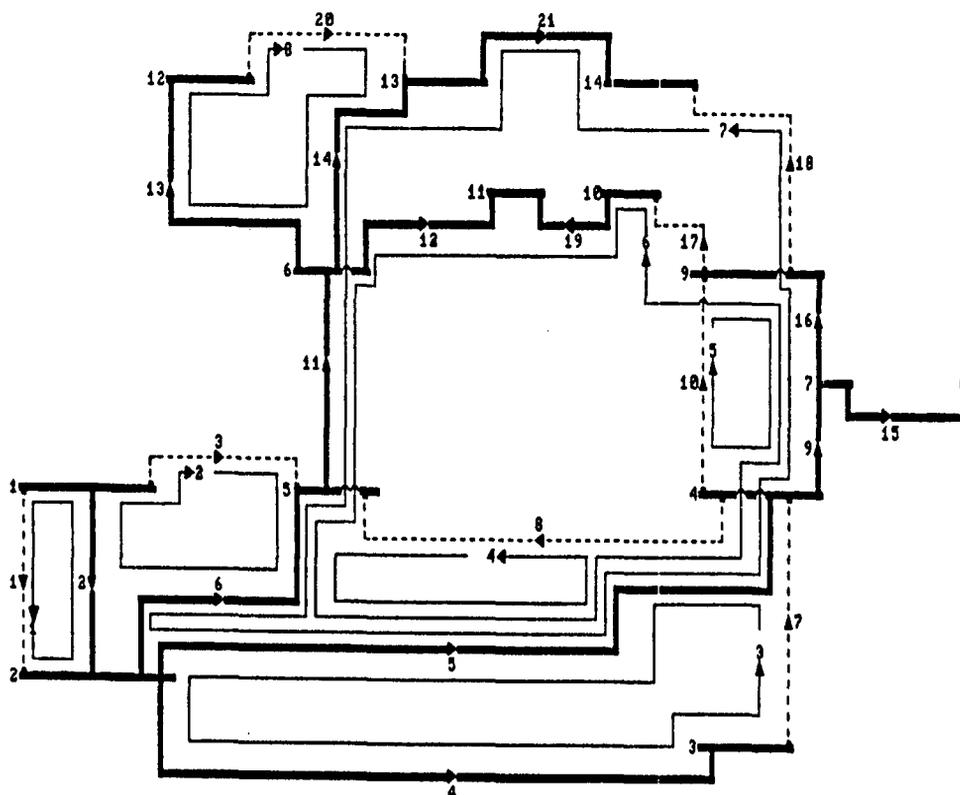


FIGURA 6.3 - Laços Fundamentais do Grafo que Representa o Sistema AEP - 14 Modificado

c) Linhas Chaveáveis Seleccionadas:

A saída principal do programa SELIC são as linhas seleccionadas do conjunto de linhas chaveáveis do sistema. Na tabela 6.7, pode ser visto quais são estas linhas para cada um dos casos preparados para estudo.

CASO NUMERO	LT/TF EM CONTINGENCIA	LT/TF'S CHAVEAVEIS SELECCIONADAS DENTRE AS 8 EXISTENTES
1	-	17,18
2	-	18
3	-	17
4	4	1,3,7,8,10,17,18,20
5	8	7,17,18
6	11	17,18
7	12	18
8	13	18,20
9	14	1,3,7,8,10,17,18,20
10	17	18
11	19	18
12	20	18
13	21	17

TABELA 6.7 - Linhas Chaveáveis Seleccionadas para Alívio das Sobrecargas Reais e Potenciais do Sistema AEP - Modificado

6.2.3 - Análise dos Resultados

Verifica-se que o programa fornece resultados interessantes, uma vez que promove, na grande maioria dos casos, uma redução bastante grande do número de linhas chaveáveis do

sistema.

Para os casos 4 e 9, não se verificou nenhuma redução. Isto se deve ao critério de seleção que faz com que todas as linhas chaveáveis que pelo menos não aumentem a corrente da linha sobrecarregada sejam selecionadas. Isto ocorre quando uma das linhas sobrecarregadas é linha chaveável (ligação do grafo), como as linhas 7 e 8, no caso 4. Ocorre também quando a corrente de uma das linhas com sobrecarga não é afetada por nenhuma das linhas chaveáveis do sistema, como é o caso da linha 12, na contingência da linha 14, caso 9.

Caso fosse avaliada o efeito do chaveamento de todas as linhas do conjunto de linhas chaveáveis, que no caso exemplo são 8, para todos os 13 casos apresentados, ter-se-ia um total de 104 linhas avaliadas. Aplicando antecipadamente o programa de seleção de linhas chaveáveis - SELIC, o total de linhas que precisam ser avaliadas cai para 32, representando uma redução de 70%.

6.3 - Aplicação do Programa DMTR ao Sistema AEP-14

6.3.1 - Resultados da Aplicação do DMTR

Neste item, foram apresentados os resultados obtidos com a aplicação do programa de determinação da mudança topológica da rede - DMTR, utilizando os mesmos dados e para os mesmos casos apresentados no item 6.2.1.

Neste sentido, na tabela 6.8 a seguir, mostra-se:

número do caso estudado; a linha em contingência (somente para os casos de ocorrência de sobrecarga potencial); as linhas com sobrecarga, acompanhada do percentual de sobrecarga, o valor da sobrecarga total para cada caso "ZY"; o número da linha chaveável ótima encontrada; o número de linhas testadas para se achar a solução e as sobrecargas persistentes, quando ocorrerem.

CASO NUM.	CONTINGENCIA LT/TF	SOBRECARGA			MANOBRA OTIMA		SOBRECARGA PERSISTENTE		
		LT/TF	%	ZY	LT/TF	NUM. LT/TF'S TESTADOS	LT/TF	%	ZY
1	-	19 21	46.07 16.95	10.0831	18	8	19	55.94	8.9509
2	-	21	16.95	2.7119	18	4	-	-	0.0000
3	-	19	46.07	7.3712	17	8	14	2.45	0.7852
4	4	7 8	41.29 8.57	36.6137	10	8	7 8	41.29 7.06	35.2504
5	8	5 12 14 19	6.39 12.79 3.18 1.22	9.6549	7	8	12	6.28	2.0090
6	11	12 14 19	25.65 9.79 14.09	15.8509	NAO	8	X	X	X
7	12	14	15.35	4.9118	18	8	8	0.33	0.2943
8	13	14	18.35	5.8730	18	8	14	13.12	4.2000
9	14	12 20	0.20 44.25	7.1417	7	8	20	42.31	6.7692
10	17	14	2.45	0.7852	18	3	-	-	0.0000
11	19	14	11.71	3.7463	18	4	-	-	0.0000
12	20	14	0.99	0.3157	7	3	-	-	0.0000
13	21	12 19	14.28 2.72	5.4396	17	8	8	2.66	2.3962

TABELA 6.8 - Resultados Obtidos com a Aplicação do Programa DMTR

6.3.2 - Análise dos Resultados

Pela tabela 6.8, verifica-se que nos casos 2, 10, 11 e 12, foi encontrada linha chaveável que, sendo retirada de

operação, elimina totalmente a sobrecarga existente. O número de circuitos testados, nestes casos, é 3 ou 4, não tendo sido necessário avaliar todas as 8 linhas chaveáveis. Isto se deve ao fato de que o critério adotado no DMTR para a busca de solução, faz com que, quando um chaveamento que elimina totalmente a sobrecarga é encontrado durante o processo de busca, este processo é interrompido e as demais linhas chaveáveis não são avaliadas.

Para os demais casos mostrados na tabela 6.7, nota-se que o número de LT/TF's testados é sempre igual a 8, que corresponde ao número de elementos do conjunto de linhas chaveáveis do sistema. Está incluído aí, o caso 6 da contingência do transformador 11, que não tem solução pelo DMTR, como pode ser visto nos resultados apresentados.

De uma forma global, somando-se o número de LT/TF's testados nos 13 casos apresentados na tabela 6.8, obtém-se um total de 86. Este total, representa o número de vezes que foram avaliadas ações de manobra sobre a topologia da rede, isto é, o total de iterações do programa DMTR.

6.4 - Conclusões

Pelos resultados obtidos da aplicação do programa de determinação de mudança topológica da rede para os casos de sobrecarga real (casos 1, 2 e 3) e de sobrecarga potencial (casos 4 a 13) do sistema AEP - 14 modificado, conclui-se que o número de testes realizados com as linhas chaveáveis do sistema, na

busca de solução, é elevado, face à necessidade de avaliar-se todos os elementos do conjunto das linhas chaveáveis para definir qual é a manobra ótima.

O processo de escolha, baseia-se na comparação do resultado (valor de ZY) proporcionado por cada uma das linhas chaveáveis. A única exceção a esta regra é do caso em que uma manobra, que elimina totalmente a sobrecarga, é encontrada antes do teste do último elemento do conjunto de linhas chaveáveis, como foram os casos 2, 10, 11 e 12, apresentados na tabela 6.8.

Conclui-se, portanto, que, quando se objetiva uma integração da manobra na rede aos recursos já consagrados de controle de sobrecarga, é preocupante o esforço dispendido na escolha da manobra ótima, conforme pode ser visto através da utilização do programa DMTR.

Por outro lado, conclui-se que a seleção de linhas chaveáveis proporcionada pelo programa SELIC é bastante eficaz na redução do número de linhas que precisam ser avaliadas, o que vem a contribuir para a viabilização da integração da manobra sobre a topologia da rede às alternativas de controle de sobrecarga em linha de transmissão ou transformador do sistema, usualmente utilizadas, quais sejam, o redespacho de geração e o corte de carga.

C A P Í T U L O 7

ANÁLISE DOS RESULTADOS E COMPARAÇÃO DOS ALGORITMOS

7.1 - Introdução

Este capítulo apresenta uma análise comparativa dos resultados e dos tempos de cálculo obtidos com a aplicação do programa SELIC associado ao programa DMTR (SELIC + DMTR) e da aplicação direta do programa DMTR.

7.2 - Análise Comparativa dos Algoritmos

Para facilitar esta análise comparativa, reuniram-se numa única tabela (tabela 7.1) os resultados apresentados nos itens 6.2.2 e 6.3.1. Nesta tabela, introduziu-se o valor da redução da sobrecarga, em termos percentuais, obtida com a manobra ótima resultante do DMTR. Além disso, incluíram-se novos resultados da aplicação do DMTR, obtidos quando a linha inicialmente escolhida como manobra ótima (tabela 6.8), é eliminada do conjunto de linhas chaveáveis.

Pela tabela 7.1, pode-se verificar, em cada caso de sobrecarga estudado, a grande redução do número de linhas chaveáveis a serem avaliadas pelo programa DMTR, quando este é precedido da seleção das linhas chaveáveis, proporcionada pelo programa SELIC. As únicas exceções são os casos 4 e 9, nos quais não se obteve qualquer redução, permanecendo a necessidade de uma avaliação das 8 linhas chaveáveis.

CASO	COM. G. LT/ TF	SOLUCAO DO DMTR				SOLUCAO DO SELIC + DMTR								SOL. DO DMTR SEM A MANOBRAS OTIMA						
		SOBRECARGA		MANOBRAS		SOBRECARGA PERSISTENTE		REDU- CAO SOBRE CARGA TOTAL ZY (%)		SELECAO		MANOBRAS		SOBRECARGA PERSISTENTE		MA- NO- BRAS LT/ TF	REDU- CAO DA SOBRE CARGA (%)			
		%	ZY	LT/ TF	NUM. LT/ TF'S TES- TADOS	%	ZY	LT/ TF	NUM. TOTAL	LI/TF'S SELEC.	LI/TF'S SELEC.	NUM. LT/ TF'S TES- TADOS	%	ZY	MAO			ZY		
																LI/TF	ZY		LI/TF	%
1	-	19 46.07 21 16.95	10.0831	18	8	19	55.94	8.9509	11.30	17,18	2	18	2	19	55.94	8.9509	7	9.0090	10.65	
2	-	21 16.95	2.7119	18	4	-	-	0.0000	100.0	18	1	18	1	-	-	0.0000	7	2.2846	15.76	
3	-	19 46.07	7.3712	17	8	14	2.45	0.7852	89.03	17	1	17	1	14	2.45	0.7852	7	6.7244	8.77	
4	4	7 41.29 8 8.57	36.6137	10	8	7 8	41.21 7.06	35.2504	3.72	1,3,7,8, 10,12, 18,20	8	10	8	7 8	41.21 7.06	35.2504	MAO	X	X	
5	8	5 12 12.79 14 3.18 19 1.22	9.6549	7	8	12	6.28	2.0090	79.18	7,17,18	3	7	3	12	6.28	2.0090	3	8.8444	8.39	
6	11	12 25.65 14 9.79 19 14.09	15.8509	MAO	8	X	X	X	X	17,18	2	MAO	2	X	X	X	X	X	X	X
7	12	14 15.35	4.9118	18	8	8	0.33	0.2943	94.13	18	1	18	1	8	0.33	0.2943	7	4.3878	10.67	
8	13	14 18.35	5.8730	18	8	14	13.12	4.2000	28.58	18,20	2	18	2	14	13.12	4.2000	7	5.4587	7.05	
9	14	12 0.20 20 44.25	7.1417	7	8	20	42.31	6.7692	5.22	1,3,7,8, 10,12, 18,20	8	7	8	20	42.31	6.7692	MAO	X	X	
10	17	14 2.45	0.7852	18	3	-	-	0.0000	100.0	18	1	18	1	-	-	0.0000	7	0.2552	67.50	
11	19	14 11.71	3.7463	18	4	-	-	0.0000	100.0	18	1	18	1	-	-	0.0000	7	3.2206	14.03	
12	20	14 0.99	0.3157	7	3	-	-	0.0000	100.0	18	1	18	1	-	-	0.0000	18	0.0000	100.0	
13	21	12 14.28 19 2.72	5.4396	17	8	8	2.66	2.3962	54.77	17	1	17	1	8	2.66	2.3962	7	3.7343	31.35	

TABELA 7.1 - RESULTADOS DO SELIC E DO DMTR PARA ANALISE COMPARATIVA DOS ALGORITMOS

A primeira constatação, observando os resultados colocados na tabela 7.1, é a de que em todos os casos, a manobra ótima, determinada pelo programa de determinação da mudança topológica da rede - DMTR, é uma das linhas selecionadas pelo programa de seleção - SELIC. A exceção observada no caso 12 é perfeitamente normal e não invalida esta afirmação, conforme será adiante esclarecido.

Outra constatação importante é a de que na maioria dos casos estudados, a seleção feita foi precisa, ou seja, apenas uma linha foi selecionada e a mesma corresponde exatamente à manobra ótima da rede (casos 2, 3, 7, 10, 11, 12 e 13). Em outros dois casos (1 e 8), apenas duas linhas foram selecionadas, o que também pode ser considerado como eficiência do método de seleção.

Destaca-se o fato de que em 10 dos 13 casos estudados, o número de linhas selecionadas foi menor ou igual ao número de linhas ou transformadores com sobrecarga. Isto se constata genericamente para sistemas reais, onde se espera sempre, por razões técnicas e econômicas, que exista um número bastante reduzido de manobras realizáveis sobre a topologia da rede.

Observando a tabela 7.1, na parte referente à "SOLUÇÃO DO DMTR", coluna "REDUÇÃO DA SOBRECARGA TOTAL - ZY (%)", nota-se, nos casos 4 e 9, que a redução verificada é bastante pequena (3,72 % e 5,22 %, respectivamente). Seguindo na tabela com estes mesmos casos até a parte referente a "SOLUÇÃO DO SELIC + DMTR", coluna "SELEÇÃO - LT/TF's SELECIONADOS", nota-se que todas as linhas chaveáveis foram selecionadas. Isto ocorre

porque, como foi visto no item 6.2.3, pelo critério de seleção do SELIC, nenhuma linha chaveável afetou a corrente da linha sobrecarregada, excetuando-se aquelas linhas que são chaveáveis e estão, coincidentemente, sobrecarregadas. Portanto, nestes casos, entre as linhas chaveáveis selecionadas não existe uma linha que na essência do critério de seleção, tenha reduzido a corrente do ramo sobrecarregado.

Pode-se relacionar este fato com a pequena redução da sobrecarga verificada com a manobra ótima escolhida. Isto leva a pensar em uma possível simplificação do critério de seleção do SELIC, o qual, na situação descrita acima, poderia não apresentar como resultado as linhas selecionadas e sim indicar que o caso tem solução impossível através de ação de manobra sobre a rede. Assim, justamente estes casos em que o esforço de cálculo no DMTR não se reduz utilizando-se o SELIC, estariam eliminados. Procedendo desta forma, a validade dos resultados não estaria comprometida e a redução dos esforços computacionais estaria preservada.

Observando-se os resultados do DMTR, quando a linha chaveável apontada como manobra ótima é retirada do conjunto de linhas chaveáveis (tabela 7.1, coluna "SOL. DO DMTR SEM A MANOBRA ÓTIMA"), vê-se que, de um modo geral, o percentual de redução de sobrecarga cai acentuadamente. Nos casos 4 e 9, o percentual de redução se anula pelo fato de não existir solução possível. Pode-se observar que nenhuma das novas manobras ótimas indicadas na tabela é linha selecionada pelo SELIC.

Cabe salientar que os dois únicos valores de redução expressivos (casos 10 e 12 com redução de 67,50% e

100,00%, respectivamente) correspondem a sobrecargas potenciais do sistema muito pequenas (2,45% e 0,99%, respectivamente).

Outro aspecto interessante observado, é o que ocorre no caso 6, contingência do transformador 11. Como pode ser visto, para concluir que não havia solução pelo DMTR, foi feita a avaliação das 8 linhas chaveáveis do sistema. Com a utilização do SELIC chega-se à mesma conclusão fazendo-se a avaliação de apenas 2 linhas chaveáveis, caracterizando mais uma vantagem do método.

Vale ressaltar, também, o que se observa no caso 12, onde a linha em contingência é a 20. Neste caso, a manobra ótima determinada pelo DMTR é a linha 7, enquanto que a única linha selecionada pelo SELIC é a linha 18. Ambas, como se vê na tabela 7.1, eliminam a sobrecarga. Duas considerações devem ser feitas para justificar este fato.

A primeira é a de que, como a linha 7 elimina a sobrecarga, logo após a sua avaliação o processo de busca do DMTR é encerrado, não havendo oportunidade de teste das demais linhas chaveáveis, como pode ser visto na tabela 7.1, onde o número de LT/TF's testados limitou-se a 3.

A segunda consideração a ser feita, diz respeito ao fato da linha 7 não ter sido incluída nas linhas selecionadas pelo SELIC e ser também solução. Naturalmente, esta linha não poderia ser selecionada uma vez que, dentro do critério de seleção do SELIC, ela não reduz a corrente da linha 14, sobrecarregada. Seria selecionada, juntamente com outras linhas, somente se não houvesse uma linha chaveável que efetivamente

reduzisse a corrente da linha 14, porém, isto ocorreu com a linha 18. A linha 7 é também solução, somente porque a sobrecarga da linha 14 é de apenas 0,99%, como pode ser visto na tabela 7.1.

7.3 - Análise Comparativa dos Tempos de Cálculo

Os tempos de cálculo obtidos com a aplicação do programa SELIC, DMTR e SELIC + DMTR nos casos apresentados na tabela 7.1, encontram-se na tabela 7.2.

CASO No.	CONTG LT\IF	SOBRECARGA (TOTAL LT's/IF's)	DMTR (TOTAL LT's/IF's TESTADOS)	SELIC+DMTR (TOTAL LT's/IF's)		TEMPO DE CALCULO(SEGUNDOS)			REDUCAO DO TEMPO COM SELIC+DMTR (%)
				SELECI.	TESTADOS	SELIC	DMTR	SELIC+DMTR	
1	—	2	8	2	2	0,71	3,46	3,13	9,54
2	—	1	4	1	1	0,49	3,08	2,75	10,71
3	—	1	8	1	1	0,49	3,41	2,80	17,89
4	4	2	8	8	8	0,83	3,46	4,23	-22,25
5	8	4	8	3	3	1,09	3,29	3,73	-13,37
6	11	3	8	2	2	0,94	3,51	2,91	17,09
7	12	1	8	1	1	0,49	3,46	2,86	17,34
8	13	1	8	2	2	0,49	3,46	2,96	14,45
9	14	2	8	8	8	0,77	3,46	4,17	-20,52
10	17	1	3	1	1	0,49	2,97	2,80	5,72
11	19	1	4	1	1	0,49	2,97	2,80	5,72
12	20	1	3	1	1	0,44	2,92	2,80	4,11
13	21	2	8	1	1	0,82	3,46	3,07	11,27

TABELA 7.2 - Tempos de Cálculo Obtidos com a Aplicação do Programa SELIC, DMTR e SELIC + DMTR

Observa-se, na tabela 7.2, que os tempos de cálculo do SELIC são diferentes para os diversos casos. Como o

processo de seleção é feito individualmente para cada linha sobrecarregada, os casos em que existem mais linhas sobrecarregadas, demandam maior tempo de cálculo.

Isto é confirmado através da análise dos tempos apresentados na tabela 7.2. Os casos 2, 3, 7, 8, 10, 11 e 12, nos quais existe apenas 1 linha de transmissão ou transformador sobrecarregado, o tempo de cálculo do SELIC é de 0,49 segundos. Nos casos 1, 4, 9, e 13, que têm dois circuitos sobrecarregados, o tempo é de aproximadamente 0,80 segundos. Já os casos 6 e 5, com 3 e 4 linhas/transformadores sobrecarregados, apresentam tempos iguais a 0,94 e 1,09 segundos, respectivamente.

Os tempos obtidos com a aplicação do DMTR, são mostrados na tabela 7.2, com o intuito de permitir uma comparação com os resultados obtidos com aplicação do programa SELIC + DMTR. Entretanto, vale ressaltar as diferenças acentuadas dos tempos dos casos 2, 10, 11 e 12 em relação aos demais. Nestes casos, o número de LT/TF's testados pelo programa foi inferior ao número total de linhas chaveáveis do sistema, e portanto, o número de iterações feitas durante os cálculos foi menor que os demais casos.

A aplicação do SELIC + DMTR resulta em tempos diferentes para os diversos casos. As diferenças são decorrentes do tempo de cálculo do SELIC, que, como foi visto, depende do número de circuitos sobrecarregados de cada caso estudado. Outro motivo básico, é a quantidade de linhas selecionadas que são avaliadas durante o processo, na parte relativa ao DMTR.

Observando os casos 2, 3, 7, 10, 11 e 12 nos

quais apenas um circuito está sobrecarregado e apenas uma linha chaveável é seleccionada, nota-se que os tempos de cálculo são os menores, da ordem de 2,80 segundos. Os casos 1, 6, 8 e 13 apresentam tempos um pouco maiores por apresentarem até 3 linhas sobrecarregadas e uma ou duas linhas seleccionadas. O tempo de cálculo dos casos 4, 5, e 9 com o SELIC + DMTR são bem mais elevados dos que os demais casos. O motivo principal para este fato, com referência ao caso 5, é o número elevado de sobrecargas existentes, o que demanda maior tempo de processamento do SELIC, aliado à quantidade de linhas relacionadas e, portanto, testados durante o processamento da parte do DMTR.

Com relação aos casos 4 e 9, os tempos obtidos são os mais elevados, uma vez que nenhuma linha chaveável é seleccionada e conseqüentemente, o processamento do DMTR é feito para todas as linhas chaveáveis. Além disso, para ambos os casos, existem dois circuitos sobrecarregados.

Comparando-se os tempos obtidos com o DMTR com os obtidos com o SELIC + DMTR, observa-se que, na grande maioria dos casos, há uma redução do tempo com a associação do SELIC ao DMTR. Isto não se verifica apenas nos casos 4, 5 e 9.

Para os casos 4 e 9 é esperado que isto ocorra, pois há simplesmente um acréscimo de tempo, relativo à parte do SELIC, que nestes casos, praticamente não muda em relação ao tempo gasto quando da aplicação do programa DMTR isoladamente. Entretanto, como já foi discutido no item 7.2, estes casos 4 e 9 podem ser interrompidos após o SELIC, uma vez que nenhuma linha chaveável foi seleccionada, e podem ser considerados como de solução impossível. Assim, os tempos de cálculo resultantes

passam a ser menores, correspondendo apenas ao tempo demandado no cálculo da parte do SELIC, de aproximadamente 0,80 segundos, bastante inferior aos obtidos com a aplicação do DMTR, iguais a 3,46 segundos.

O resultado da comparação dos tempos de cálculo do caso 5 aponta um parâmetro importante na determinação da conveniência ou não da utilização do SELIC associado ao programa DMTR. Este parâmetro é a quantidade de linhas de transmissão ou transformadores sobrecarregados do sistema. O caso 5 é o que apresenta mais linhas sobrecarregadas (4); e conseqüentemente, é o que demanda maior tempo de cálculo do SELIC (1,09 seg.).

Obviamente, a determinação de um número de circuitos sobrecarregados para decisão da utilização do SELIC + DMTR, é função do tamanho do sistema. Quanto maior o sistema, maior será o número de linhas chaveáveis e maior será o esforço computacional do DMTR, tornando atrativa a utilização do SELIC + DMTR mesmo em casos de elevada quantidade de circuitos sobrecarregados. Desconsiderando-se os casos 4 e 9, pelos motivos já expostos, e mesmo mantendo-se o caso 5, a redução do tempo de cálculo médio, obtido com aplicação do SELIC + DMTR, é de aproximadamente 10%.

7.4 - Conclusões a Respeito dos Resultados

Pela análise comparativa apresentada, pode-se concluir que o método desenvolvido para seleção de linhas chaveáveis, com o objetivo de reduzir o número de casos a serem

tratados pelo programa de determinação da mudança topológica da rede - DMTR, para o caso de retirada de circuitos, é eficiente.

A aplicação do programa de seleção de linhas chaveáveis - SELIC, proporciona uma redução significativa do número de linhas que precisam ser avaliadas. Para os casos estudados, esta redução foi de 86 para 32 casos (cerca de 63%).

Em 54% dos casos, apenas a linha correspondente à manobra ótima foi selecionada, demonstrando que o método, na maioria dos casos estudados, é preciso e descarta a necessidade de avaliação de linhas chaveáveis ineficazes.

Sob o aspecto prático, o fato de apenas uma linha chaveável apresentar-se como solução é normal e até esperado, para os sistemas elétricos brasileiros. São sistemas pouco malhados, que por este motivo, oferecem poucas alternativas viáveis de controle através de chaveamento de circuitos.

Conclui-se da análise dos resultados que em nenhuma situação a manobra ótima do sistema para alívio/eliminação de sobrecarga deixa de ser selecionada.

Na grande maioria dos casos, o número de linhas selecionadas é menor ou igual ao número de linhas com sobrecarga.

Os casos em que, pelo critério de seleção, nenhuma linha reduz a corrente da linha sobrecarregada, o número de linhas chaveáveis selecionadas não é tão reduzido. Entretanto, nestes casos, a redução da sobrecarga, obtida após a escolha e retirada da linha correspondente à manobra ótima é muito pequena.

O programa DMTR, por vezes, deixa de apresentar como solução para a eliminação de sobrecarga, a linha chaveável que, pelo critério de seleção formulado no SELIC, é a mais

efetiva no cumprimento deste objetivo.

Nos casos em que a solução através da manobra na rede é impossível, o SELIC mostra-se igualmente eficiente, diminuindo o número de linhas que seriam, sem sucesso, avaliadas no DMTR.

Os tempos de cálculo do programa SELIC + DMTR são inferiores aos tempos de cálculo do programa DMTR.

O número de linhas sobrecarregadas no sistema é fator importante na obtenção de maior ou menor redução de tempo de cálculo utilizando-se o programa SELIC + DMTR, em relação ao programa DMTR.

C A P Í T U L O 8

CONCLUSÃO

8.1 - Conclusões Finais do Trabalho

- a) O critério de seleção de manobras candidatas à eliminação de sobrecarga, adotado neste trabalho, mostra-se satisfatório e tem a seu favor o fato de considerar os conceitos da física do problema, não sendo um critério puramente matemático;
- b) O método de seleção das linhas chaveáveis desenvolvido com o objetivo de reduzir o número de manobras candidatas a serem estudadas pelo programa DMTR, mostra-se eficiente, proporcionando uma diminuição significativa no esforço computacional dispendido neste;
- c) Os resultados obtidos, utilizando-se o algoritmo desenvolvido para seleção de linhas chaveáveis baseado na filosofia proposta, mostraram-se bastante coerentes;
- d) A redução do esforço dispendido no DMTR, com a aplicação do programa de seleção de linhas chaveáveis - SELIC, contribui de maneira decisiva para a integração da alternativa de controle de sobrecarga através da mudança da topologia da rede às alternativas de controle usuais do Fluxo de Potência, quais sejam: redespacho de geração e corte de carga;
- e) O método e o programa de seleção de linhas chaveáveis

(SELIC), desenvolvidos neste trabalho, podem ser convenientemente adaptados para associação com outros programas de controle de sobrecarga através de ações de chaveamento sobre a rede, a exemplo do que foi feito com o DMTR, com o objetivo de reduzir o esforço computacional e o tempo de cálculo dos mesmos;

- f) A utilização das alternativas de controle, após a integração da mudança da topologia da rede, feita considerando-se a ordem de prioridade ditada pela ótica de operação de sistema, proporciona uma exploração maior dos recursos do sistema, antes de afetar a continuidade do fornecimento de energia e, portanto, o consumidor;
- g) A integração dos programas de Despacho de Geração em Tempo Real - DGTR, de Seleção de Linhas Chaveáveis - SELIC e de Determinação da Mudança Topológica da Rede - DMTR, resultou no programa de Fluxo de Potência com Redespacho, Manobras Selecionadas e Corte de Carga - FLUP -RMSC, que atende à utilização dos recursos de controle segundo a ótica de operação de sistema.

8.2 - Recomendações para Aperfeiçoamento do Programa FLUP-RMSC

- a) Recomenda-se que seja acrescentado ao algoritmo do programa SELIC, um passo adicional que automaticamente adapte o programa para o caso em que o número de linhas chaveáveis reais do sistema difere do número de ligações do grafo que o representa. Seja gerando tantos conjuntos de linhas chaveáveis quantos forem necessários, até cobrir todas as

linhas existentes (quando o número de linhas chaveáveis é maior do que o número de ligações) ou gerando linhas "pseudo-chaveáveis", utilizando linhas que na realidade não podem ser manobradas (quando o número de linhas chaveáveis é menor do que o número de ligações):

- b) Recomenda-se que, quando o programa SELIC tiver como resultado a seleção de apenas uma linha ou transformador, o programa DMTR calcule diretamente os trânsitos e as sobrecargas persistentes do sistema, dispensando a simulação da retirada da linha de operação, através da injeção de compensação, visando uma redução do tempo de cálculo;
- c) Visando uma utilização plena do algoritmo desenvolvido, relativo ao programa FLUP-RMSC, recomenda-se que seja feita uma otimização da integração dos programas DGTR, SELIC e DMTR, de forma a reduzir os tempos de cálculo e esforços computacionais.

8.3 - Sugestões para Futuros Trabalhos

Como sugestões para futuros trabalhos, são apresentados alguns aspectos detectados durante o desenvolvimento da pesquisa, que merecem ser melhor estudados. Entre eles destacam-se:

- a) Aplicar uma metodologia semelhante à desenvolvida neste trabalho para seleção de manobras de adição de linhas de transmissão ao sistema, visando o alívio de sobrecarga.
- b) Aplicar a metodologia de seleção de linhas chaveáveis,

desenvolvida neste trabalho, em associação com outros métodos de controle de sobrecarga através de ação de chaveamento de circuitos, visando uma avaliação da redução obtida dos esforços computacionais e dos tempos de cálculo envolvidos.

- c) Introduzir no programa de Determinação da Mudança Topológica da Rede - DMTR, a possibilidade de mudança na ordem do grafo da rede, ou seja, considerar manobras de reconfiguração de subestação. Mazi et alii, em 1986 [20], apresentaram uma técnica de representação do seccionamento de barramento como alternativa de controle, que pode ser explorada;
- d) Avaliar os aspectos de perda de confiabilidade associada às manobras candidatas ao alívio de sobrecarga e implementar em computador uma sistemática para avaliação integrada com os problemas de controle de sobrecarga através de manobra sobre a rede;
- e) Avaliar os aspectos de perda de confiabilidade associada à alternativa de controle de sobrecarga através de manobra na rede frente à alternativa da realização de corte de carga e, inclusive, redespacho de geração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] - AGUILAR, A. H. G. Despacho de geração para o controle em tempo real dos sistemas de potência. Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 1986. (Tese de Mestrado)
- [02] - BACHER, R. & GLAVITSCH, H. Network topology optimization with security constraints. IEEE Trans. Power Systems, vol. PWR5 -1(4):103-111, nov. 1986.
- [03] - BAKIRTZIS, A. G. & MELIPOULOS, A. P. Sakis. Incorporation of switching operations in power system corrective control computations. IEEE Trans. Power Systems, vol. PWR5 -2(3):669-676, aug. 1987.
- [04] - CAVATI, C. R. & PRADA, R. B. Redução de sobrecargas através de ações de chaveamento de circuitos. In: CBA - ITA, 7. São José dos Campos, S.P.
- [05] - CLOSE, Charles M. Circuitos lineares. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos: São Paulo, Editora Universidade de São Paulo, 1975. v.1
- [06] - DAVID, J. M.; DODU, J. C.; MERLIN, A. On the search of optimal switching configurations in power transmission system studies. Dept. Methodes D'optimisation, Electricite de France, Paris, France. Bull. Dir. Etud.

and Rech. ser. B. n.3. p.5-12, 1982.

[07] - DODU, J. C.; MERLIN, A.; DAVID, J. M. On the search of optimal switching configuration in power transmission system studies. In: POWER SYSTEMS COMPUTATION CONFERENCE, 7. Proceedings. Lausanne, July, 12-17, 1981.

[08] - GLAVITSCH, H. Switching as means of control in the power systems: state of the art review. Electrical Power & Energy Systems, 7(2):92-100, apr. 1985.

[09] - GLAVITSCH, H.; KRONIG, H.; BACHER, R. Combined use of linear programming and load flow techniques in determining optimal switching sequences. In: POWER SYSTEMS COMPUTATION CONFERENCE, 8. Proceedings. Helsinki, aug., 19-24, 1984.

[10] - GORENSTIN, B. G. Chaveamento de circuitos para alívio de sobrecarga. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1985. (Tese de Mestrado)

[11] - GORENSTIN, B. G.; TERRY, L. A.; PEREIRA, M. V. F.; PINTO, L. M. V. G. A framework for integration of network topology optimization and generation rescheduling in power system security applications. In : POWER SYSTEMS COMPUTATION CONFERENCE, 1987.

Proceedings. Cascais, Portugal.

- [12] - KOGLIN, H. J. & MEDEIROS, M. F. Corrective switching approaching online application. In: CIGRE/IFAC SYMPOSIUM. Proceedings. Rio de Janeiro, Brazil, July, 22-25, 1985.
- [13] - KOGLIN, H. J. & MULLER, H. Corrective switching: a new dimension in optimal load flow. International Journal of Electric Power and Energy Systems, 4(2): 142-149, apr. 1982.
- [14] - KOGLIN, H. J. & MULLER, H. First experiences with computer-aided corrective switching. In: POWER SYSTEMS COMPUTATION CONFERENCE, 7. Proceedings. Lousane, Switzerland, July, 12-17, 1981. p.474-81.
- [15] - KOGLIN, H. J. & MULLER, H. Overload reduction through corrective switching actions. In: IEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM MONITORING AND CONTROL, London, England, June, 24-26, 1980. p. 159-64 (Conference Publication, 187).
- [16] - LeREVEREND, B. K. Relatório especial do grupo 39 (Operação e controle de sistemas), sobre os estudos apresentados e os assuntos preferenciais selecionados para discussão, durante a sessão da CIGRÉ (Conference Internationale Des Grands Reseaux Electriques a Haute

Tension), em 1988.

- [17] - MACHADO, L. J. B. & AGUILAR, A. H. G. Análise de alternativas de controle corretivo através do despacho de geração em tempo real para sistemas elétricos de potência. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 6. Anais. Belo Horizonte, Brasil, nov., 25-28, 1986, vol.2, p.757-762.
- [18] - MACHADO, L. J. B. & AGUILAR, A. H. G. Despacho de geração para o controle em tempo real de sistemas de potência. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE AUTOMÁTICA, 2. Anais. Buenos Aires, Argentina, out., 1986, vol.2, p.437-442.
- [19] - MACHADO, L. J. B. & UNGARETTI, V. S. Exame de alternativas de controle via mudanças na topologia da rede visando o alívio de sobrecarga dentro do despacho de segurança em tempo real. In: CONGRESSO CHILENO DE ENGENHARIA ELÉTRICA, 9. Proceedings. Santiago, Chile, nov., 1987.
- [20] - MAZI, A. A.; WOLLENBERG, B. F.; HESSE, M. H. Corrective control of power flows by line and bus-bar switching. IEEE Trans. Power System., vol. PWR-1(3): 258-65, aug. 1986.
- [21] - MELIOPOULOS, A. P. & BAKIRTZIS, A. G. Corrective control computations for large power systems. IEEE Trans. on

Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102(11):3598-3604, nov. 1983.

- [22] - MELIOPOULOS, A. P.; BAKIRTZIS, A. G.; KOVACS, R. R.; BECK, R. J. Bulk power system reliability assessment: experience with the RECS Program. In: POWER INDUSTRY COMPUTER APPLICATION - PICA CONFERENCE, may, 1985. p. 38-46. (IEEE T-PWRS, 235-243, aug. 1986.)
- [23] - MONTICELLI, A. Fluxo de carga em redes de energia elétrica. São Paulo: Edgar Blucher, 1983. 164p.
- [24] - NOZICA, R.; DONA, V. M.; RIVERA, J. F. - Comparación de técnicas para la evaluación de seguridad en la operación de sistemas eléctricos. In: Encontro Regional Latino-Americano da CIGRÉ, 3. Foz do Iguaçu, 30 abr. - 04 maio 1989. 7p.
- [25] - PEREIRA, M. V. F.; GRANVILLE, S.; GORENSTIN, B.; TERRY, L. A.; MONTICELLI, A. Automatic operations rescheduling with static security constraints. In: SIMPÓSIO DE ESPECIALISTAS EM PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO ELÉTRICA, 1. Agosto, 17-21, 1987.
- [26] - SCHNYDER, G. & GLAVITSCH, H. Integrated security control using an optimal power flow and switching concepts. IEEE Trans. on Power Systems, 3(2):782-790, may 1988.

- [27] - STAGG, Glenn W. & EL-ABIAD, Ahmed H. Computação aplicada a sistemas de geração e transmissão de potência. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1979. 421 p.
- [28] - UNGARETTI, V. S. Determinação de alternativas de controle via mudanças na topologia da rede para alívio de sobrecargas em tempo real. Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 1987. 194p. (Tese de Mestrado)
- [29] - VAN AMERONGEN, R. A. M. & VAN MEETEREN, H. P. Security control by real power rescheduling, network switching and load shedding. In: CIGRE REPORT n. 32-02, aug. 27-sept. 4, 1980.
- [30] - WU, F. F. Real-time network security monitoring, assessment and optimization. In: POWER SYSTEMS COMPUTATION CONFERENCE, 9. Proceedings. Cascais, Portugal, aug. 31 - set. 4, 1987.