

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DETERMINAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE CONTROLE VIA
MUDANÇAS NA TOPOLOGIA DA REDE PARA ALÍVIO DE
SOBRECARGAS EM TEMPO REAL

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

VICTOR SERNA UNGARETTI

FLORIANÓPOLIS, MAIO 1987

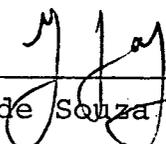
DETERMINAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE CONTROLE VIA
MUDANÇAS NA TOPOLOGIA DA REDE PARA ALÍVIO DE
SOBRECARGAS EM TEMPO REAL

Victor Serna Ungaretti

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

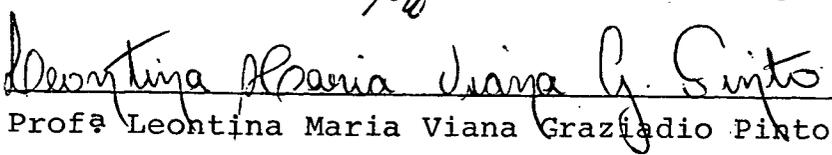


Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, Dr. Ing.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

APRESENTADA PERANTE A BANCA EXAMINADORA COMPOSTA DOS PROFESSORES



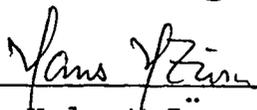
Prof. Luiz Jairo Branco Machado, Dr. Ing.



Profª Leontina Maria Viana Graziadio Pinto, M.Sc.



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



Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.

À minha noiva Maria Clara
pela compreensão e carinho.

À minha noiva Maria Clara
pela compreensão e carinho.

Aos meus Pais, Irmã, Cunhado,
Tio Elias e Tia Nena.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Luiz Jairo Branco Machado, pela ajuda na orientação deste trabalho.

Aos Professores Ildemar Cassana Decker e Marciano Morozowski Filho pela amizade e colaboração neste trabalho.

À Maria Clara, minha noiva, pela paciência e carinho e a meus tios Elias e Nena, pelo grande incentivo transmitidos durante a execução deste trabalho.

À meus pais, Victor e Terezinha, como gratidão por tudo que fizeram por mim.

À Marlei pela datilografia e principalmente pela paciência e amizade.

À todos os professores e colegas da Pós-Graduação que de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina pelo apoio técnico e ao Instituto de Recursos Hidráulicos y Electrificación (I. R. H. E.), pelo apoio financeiro.

Agradeço ao Todo Poderoso pela certeza da concretização deste trabalho.

S U M Á R I O

RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	
1.1 - Aspectos Básicos do Problema de Determinação de Alternativas de Controle para a Operação em Tempo Real dos Sistemas de Potência	01
1.2 - Breve Descrição do Problema de Determinação de Alternativas de Controle via Mudanças na Topologia da Rede para Alívio de Sobrecargas	02
1.3 - Resumo Histórico do Desenvolvimento do Problema Tratado neste Trabalho	03
1.4 - Objetivos e Principais Contribuições deste Trabalho	04
1.5 - Organização deste Trabalho	05
CAPÍTULO 2 - ASPECTOS DA ANÁLISE DE SEGURANÇA EM TEMPO REAL	
2.1 - Introdução	08
2.2 - Análise de Segurança em Tempo Real	09
2.3 - Despacho de Geração em Tempo Real	11
2.4 - Mudanças na Topologia da Rede. Filosofia Adotada neste Trabalho	12

2.5 - Comentários	14
CAPÍTULO 3 - MUDANÇAS NA TOPOLOGIA DA REDE VISANDO O ALÍVIO DE SOBRECARGA NA ANÁLISE DE SEGURAN ÇA EM TEMPO REAL	
3.1 - Introdução	15
3.2 - Formulação do modelo de Mudanças na Topologia da Rede	18
3.2.1 - Aplicação do Teorema da Compensação a Situa ções nas quais Ocorrem Alterações Simples (um ramo por vez)	19
3.2.1-a - Remoção de um Circuito Qualquer (i - m) ..	25
3.2.1-b - Adição de um Circuito Qualquer (i - m) ...	26
3.2.2 - Aplicação do Teorema da Compensação a Situa ções nas quais Ocorrem Alterações Múltiplas (n ramos simultaneamente)	28
3.2.3 - Expressão dos Trânsitos em Função das Inje ções de Compensação	32
3.3 - Formulação do Problema de Mudanças na Topologia da Rede visando o Alívio de Sobrecargas	35
3.3.1 - Problema de Primeiro Nível. Determinação da Melhor Alternativa de Mudança Topológica da Rede	35
3.3.2 - Problema de Segundo Nível. Determinação dos Desvios de Geração e Alívios de Carga para a Nova Topologia Resultante após a (s)	

manobra (s) m_1^* ($\{m\}^*$)	42
3.4 - Conclusões	45
CAPÍTULO 4 - FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE DETERMINAÇÃO DA MELHOR ALTERNATIVA DE MUDANÇA TOPOLÓGICA DA REDE VIA PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA. TÉCNICA DE SOLUÇÃO	
4.1 - Introdução	47
4.2 - Problemas de Programação Linear Inteira	48
4.3 - Problemas de Programação Linear Inteira do Tipo Zero-Um	50
4.3.1 - Formulação do Sub-Problema: Determinação da Melhor Alternativa de Mudança Topológica da Rede, como uma Programação Linear Inteira do Tipo Zero-Um	53
4.4 - Técnica de Separação e Avaliação Progressiva ("Branch and Bound")	55
4.5 - Técnica de "Enumeração Implícita"	60
4.6 - Algoritmo de Separação e Avaliação Progressiva Usando a Técnica de Enumeração Implícita para a Solução de Problemas de Programação Linear Inteira do Tipo Zero-Um	61
4.7 - Algoritmo de Separação e Avaliação Progressiva Aplicado à Solução do Sub-Problema Determinação da Melhor Alternativa de Mudança Topológica da Rede .	67
4.8 - Conclusões	71

CAPÍTULO 5 - DESCRIÇÃO DO PROGRAMA DESENVOLVIDO PARA A SOLUÇÃO DO PROBLEMA ATRAVÉS DE COMPUTADOR	
5.1 - Introdução	73
5.2 - Entrada de Dados	74
5.3 - Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples - Subprograma 1	76
5.3.1 - Algoritmo e Fluxograma do Subprograma de Retirada de Circuitos - Alterações Simples	76
5.3.2 - Descrição do Subprograma de Retirada de Circuitos - Alterações Simples	80
5.4 - Algoritmo de Adição de Circuitos - Alterações Sim ples e Múltiplas - Subprograma 2	83
5.4.1 - Algoritmo e Fluxograma do Subprograma de Adição de Circuitos - Alterações Simples e Múltiplas	83
5.4.2 - Descrição do Subprograma de Adição de Cir cuitos - Alterações Simples e Múltiplas .	89
5.5 - Fluxograma Completo da Versão Atual do Programa para Solução do Problema de Mudanças na Topologia da Rede visando o Alívio de Sobrecargas dentro da Análise de Segurança em Tempo Real	95
5.6 - Conclusões	97

CAPÍTULO 6 - RESULTADOS DA UTILIZAÇÃO DO ALGORITMO DE
RETIRADA DE CIRCUITOS - ALTERAÇÕES SIM-
PLES - SUBPROGRAMA 1

6.1 - Introdução	98
6.2 - Sistema AEP - 14: Dados e Comentários	99
6.3 - Resultados da Utilização do Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples - Subprograma 1 sobre o Sistema AEP - 14	108
6.4 - Análise dos Resultados para os Casos Estudados so- bre o Sistema AEP - 14	116
6.5 - Sistema Sul: Dados e Comentários	117
6.6 - Resultados da Utilização do Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples - Subprograma 1 sobre o Sistema Real	127
6.7 - Análise dos Resultados para os Casos Estudados so- bre o Sistema Sul	129
6.8 - Sistema IEEE - 118 Barras : Dados e Comentários ...	130
6.9 - Resultados da Utilização do Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples Subprograma 1 so- bre o Sistema IEEE - 118 Barras	137
6.10 - Análise dos Resultados para os Casos Estudados so- bre o Sistema IEEE - 118 Barras	141
6.11 - Conclusões	142

CAPÍTULO 7 - RESULTADOS DA UTILIZAÇÃO DO ALGORITMO DE	
ADICÃO DE CIRCUITOS - ALTERAÇÕES SIMPLES	
E MÚLTIPLAS - SUBPROGRAMA 2	
7.1 - Introdução	144
7.2 - Sistema AEP - 14: Dados e Comentários	145
7.3 - Resultados da Utilização do Algoritmo de Adição de	
Circuitos - Alterações Simples e Múltiplas - Sub-	
programa 2 sobre o Sistema AEP - 14	148
7.4 - Análise dos Resultados para os Casos Estudados so-	
bre o Sistema AEP - 14	164
7.5 - Sistema Real: Dados e Comentários	165
7.6 - Resultados da Utilização dos Algoritmo de Adição	
de Circuitos - Alterações Simples e Múltiplas - Sub	
programa 2 sobre o Sistema Sul	167
7.7 - Análise dos Resultados para os Casos Estudados so-	
bre o Sistema Sul	170
7.8 - Conclusões	171
CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES	
8.1 - Conclusões Finais	173
8.2 - Sugestões para Futuros Trabalhos	175
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	176
APÊNDICE A - FORMULAÇÃO DO MODELO DA REDE ELÉTRICA UTI-	
LIZADA NESTE TRABALHO	
A.1 - Equações da Rede	180

A.2 - Equações dos Trânsitos de Potência Ativa nos Ramos da Rede	185
APÊNDICE B - ALGUMAS CONSIDERAÇÕES À RESPEITO DA RETI- RADA DE ELEMENTOS, ALTERAÇÕES SIMPLES PA RA ALÍVIO DE SOBRECARGAS	189

R E S U M O

Neste trabalho é estudado o problema de mudanças na topologia da rede visando eliminar sobrecargas que persistem após a Análise de Segurança em Tempo Real.

Este problema é decomposto em dois níveis através da adoção de uma filosofia apropriada que procura estar de acordo com aquela que é praticada na operação. No primeiro nível é tratado o problema de mudanças na topologia da rede através de uma Programação Linear Inteira do tipo zero-um. Se as sobrecargas persistem, no segundo nível se recorre a um Despacho de Segurança formulado como um Programa Linear. A solução obtida só é aceita se passar no teste de verificação que consiste em resolver um fluxo de carga CA.

Para tratar o problema no primeiro nível de decomposição foram desenvolvidos dois algoritmos. Um algoritmo trata da Retirada de Elementos - Alterações Simples, e o outro trata da Adição de Elementos - Alterações Simples e Múltiplas. O problema no segundo nível é resolvido através do DGTR (Despacho de Geração em Tempo Real) do LABSPOT da UFSC.

Os algoritmos desenvolvidos foram testados sobre o Sistema AEP - 14 da IEEE, sobre uma certa configuração do Sul do Brasil e sobre o sistema IEEE de 118 barras.

Finalmente são apresentadas as principais conclusões e algumas sugestões para futuros trabalhos.

A B S T R A C T

In this work the problem of changes in network topology is studied with the aim of eliminating overloads that persist after real time security analysis.

This problem is decomposed into two levels by using a philosophy which is in agreement with the rules practiced by system operation. In the first level the problem of network topology change is treated as an zero-one integer linear program. If overloads persist, at the second level a security dispatch is invoked in form of a Linear Program. In any case the solution is only accepted if it passes an AC load flow test.

In order to treat the problem at the first decomposition level, two algorithms have been developed. One concerns the removal of elements - simple changes, and the other refers to the addition of elements - simple and multiple changes. The problem at the second level is solved through the Real Time Generation Dispatch Program (DGTR) available at the Power Systems Laboratory (LABSPOT) at the Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

The IEEE (AEP) - 14 Test System, a system based on the Southern Brazilian System and the IEEE - 118 Test System are used to test the algorithms developed.

Finally the main conclusions and some suggestions for future work are presented.

C A P Í T U L O 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Aspectos Básicos do Problema de Determinação de Alternativas de Controle para a Operação em Tempo Real dos Sistemas de Potência

Na operação dos sistemas de potência o objetivo principal é o de fornecer ao usuário um serviço de energia elétrica com nível de qualidade aceitável e ao menor custo possível. Para isto, se faz necessário o estudo de alternativas de controle que possibilitem soluções dos problemas operacionais no menor tempo possível, visando auxiliar o operador na tomada de decisões em tempo real. Essas alternativas de controle constituem as estratégias de operação, para ações de controle preventivo e/ou corretivo, contra eventos, que (como as sobrecargas que surgem devido a falhas de algum equipamento de produção ao transmissão), possam provocar a ultrapassagem de certos limites de transporte ou regulação. Essas ações de controle também podem ser efetuadas no sentido de minimizar os custos de produção.

As ações de controle preventivo e/ou corretivo para alívio de sobrecargas mais usuais são baseadas em redespachos, ou mesmo em cortes de carga. No entanto, algumas vezes essas ações de controle não são suficientes para proporcionar uma solução aos problemas da operação e nesses casos surge a necessidade de procurar outras alternativas de controle. Dentre estas alternativas encontram-se as opções possíveis por mudan

ças na topologia da rede.

1.2 - Breve Descrição do Problema de Determinação de Alternativas de Controle via Mudanças na Topologia da Rede para Alívio de Sobrecarga

Na operação dos Sistemas de Potência as ações via mudanças na topologia da rede para alívio de sobrecarga podem ser consideradas como uma alternativa de controle dentro da Análise de Segurança em Tempo Real. Por tal razão surge a necessidade de efetuar estudos sobre a efetividade destas opções de controle para a operação em tempo real.

O problema de mudanças na topologia da rede, como alternativa de controle para o alívio de sobrecargas, é um problema complexo que apresenta variáveis contínuas e variáveis bivalentes, estas últimas sendo associadas às operações elementares que permitem considerar as modificações topológicas da rede elétrica. Por tal motivo é basicamente um problema de programação linear mista.

No Capítulo 3 o problema é apresentado como um problema de programação linear mista em dois níveis. No primeiro nível, é tratado basicamente o problema da melhor alternativa de mudança topológica da rede, como um problema de programação linear inteira do tipo zero-um. No segundo nível é tratado o problema do Despacho de Segurança (DS) [8], como um problema de programação linear.

1.3 - Resumo Histórico do Desenvolvimento do Problema Tratado neste Trabalho

O primeiro trabalho com um tratamento algorítmico para o problema de mudanças na topologia da rede para alívio de sobrecargas foi proposto por Koglin e Müller [16] em 1980. Desde então, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos para a solução do problema.

Nesse trabalho [16] é mostrado como o problema, pelo fato de existirem várias manobras possíveis adquire um carácter combinatório e para resolvê-lo os autores propõem um método de solução baseado na enumeração de todas as possíveis manobras.

Na referência [17] Koglin e Medeiros, fazem uma extensão do método apresentado em [16] para resolver o problema. É proposto, no caso, uma avaliação de todas as manobras possíveis. Um método chamado de "Injeção Invertida" ("Backward Injection") é usado para medir os efeitos, sobre a rede elétrica em estudo, de todas as manobras. Estes efeitos são avaliados por um conjunto de regras heurísticas, e são selecionadas as melhores manobras, isto é, as que eliminam ou mais diminuem as sobrecargas.

O inconveniente de tratar o problema com métodos como os mencionados acima, é o fato de se ter que examinar um grande número de possíveis manobras.

Em outros trabalhos, Mazi e outros [12], Bacher e outros [13], Dodu e outros [14], Gorenstin [15], Amerongen e outros [21], são propostos métodos para solucionar o problema de mudanças na topologia da rede para alívio de so

sobrecargas, baseados em técnicas de busca sistemática. No Capítulo 3 procura-se dar uma idéia de como o problema é tratado nos trabalhos mais recentes [12, 13, 15].

Pode-se observar, através da análise dos diversos trabalhos publicados desde 1980, que os métodos desenvolvidos desde então, 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.

1.4 - Objetivos e Principais Contribuições deste Trabalho

O presente trabalho tem como objetivo estudar e propor alternativas de controle via mudanças na topologia da rede dentro da Análise de Segurança em Tempo Real, para o alívio de sobrecargas reais e/ou potenciais que não podem ser eliminadas por um redespacho e/ou mesmo com cortes de carga. Isto é, para aqueles casos considerados de solução impossível pelo Despacho de Segurança do Modelo de Despacho de Geração em Tempo Real (DGTR) [18].

Considera-se como principais contribuições deste trabalho:

a) A adoção de uma filosofia de solução do problema que corresponde ao sentimento corrente da operação, de que as manobras sobre a rede devem ser aceitas com cuidado e se possível, como último recurso;

b) A decomposição do problema em dois níveis, já em decorrência da filosofia acima adotada;

c) O exame de alternativas, tanto de manobras de retirada, como de adição de elementos à rede básica;

d) A implantação de um algoritmo, em dois níveis, que permite encontrar a melhor manobra de retirada, ou a melhor manobra (ou conjunto de manobras) no caso de adição de elementos;

e) O uso de uma técnica do tipo Separação e Avaliação Progressiva para resolver o problema no primeiro nível, formulado como um Problema de Programação Linear Inteira do tipo Zero-Um, que simplifica muito as operações sobre o computador, fornecendo a melhor solução em tempos compatíveis com a Análise de Segurança em Tempo Real.

f) O uso do DGTR [8] para realizar o Despacho de Segurança (DS) somente para a melhor manobra escolhida no primeiro nível, evitando perda de tempo computacional com o exame de manobras ou conjunto de manobras ineficientes para a solução do problema.

g) A possibilidade de evitar o recurso ao DGTR se a manobra for suficiente para eliminar completamente as sobrecargas, o que ocorre em muitos casos.

1.5 - Organização deste Trabalho

No Capítulo 2, de forma tal a situar este trabalho dentro da Cadeia de Tratamentos em Tempo Real, apresentam-se os principais aspectos da Análise de Segurança em Tempo Real, dando-se ênfase a sua função Despacho de Geração em Tempo Real.

No Capítulo 3 é apresentado o método de solução proposto neste trabalho para resolver o Problema de Mudanças na Topologia da Rede visando o Alívio de Sobrecargas na Análise de Segurança em Tempo Real. Apresenta-se também a formulação do Problema de Mudanças na Topologia da Rede.

No Capítulo 4 é apresentada a formulação matemática do problema de determinação da melhor alternativa de mudança topológica da rede.

Faz-se uma breve recapitulação acerca dos Problemas de Programação Linear Inteira.

Apresenta-se também a formulação dos Problemas de Programação Linear Inteira do tipo zero-um bem como as técnicas geralmente usadas na construção de algoritmo para resolver tais tipos de problemas. Um algoritmo básico, empregando a técnica de Separação e Avaliação Progressiva utilizadas para resolver Problemas de Programação Linear Inteira do tipo zero-um, é descrito neste Capítulo. Finalmente é descrito o algoritmo completo acompanhado de seu fluxograma.

No Capítulo 5 é descrito o programa desenvolvido para a solução do problema através de computador, que na forma atual se encontra subdividido em dois subprogramas.

- Subprograma 1 - Retirada de Circuitos (Alterações Simples);
- Subprograma 2 - Adição de Circuitos (Alterações Simples e Múltiplas),

os quais são apresentados com seus respectivos fluxogramas.

Detalhes sobre a preparação de dados necessários para a utilização de ambos os subprogramas bem como a descrição

dos mesmos com variáveis, matrizes, vetores e demais elementos que permitem interpretá-los, completam este Capítulo.

No Capítulo 6 são apresentados e analisados os resultados obtidos pela utilização do Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples - Subprograma 1, sobre três sistemas elétricos: o Sistema AEP - 14 da IEEE (de 14 barras e 21 circuitos), o Sistema Sul do Brasil (de 45 barras e 57 circuitos) e o sistema Teste de 118 barras da IEEE (de 118 barras e 179 circuitos).

No Capítulo 7, por sua vez são apresentados os resultados obtidos da utilização do Algoritmo de Adição de Circuitos - Alterações Simples e Múltiplas - Subprograma 2, sobre dois Sistemas Elétricos, o Sistema AEP - 14 da IEEE (de 14 barras e 21 circuitos) e o Sistema Sul do Brasil (de 45 barras e 57 circuitos).

Finalmente, no Capítulo 8, apresentam-se conclusões finais e as sugestões para futuros trabalhos.

Os Apêndices A e B, apresentam respectivamente, a Formulação do Modelo da Rede Elétrica utilizada neste trabalho; Algumas Considerações à Respeito da Retirada de Elementos - Alterações Simples para Alívio de Sobrecargas.

C A P Í T U L O 2

ASPECTOS DA ANÁLISE DE SEGURANÇA EM TEMPO REAL

2.1 - Introdução

O objetivo principal da operação de um Sistema Elétrico de Potência é o de manter o equilíbrio a cada instante entre a geração e o consumo, assegurando o atendimento de todas as cargas com padrões aceitáveis de qualidade e ao menor custo possível. Este objetivo é alcançado através da execução de um conjunto de ações de controle sobre os equipamentos de produção e transporte.

Entretanto, estes equipamentos estão sujeitos a falhas (provocando saídas não programadas de linhas e geradores), podendo alterar a configuração da rede e atingir estados de operação indesejáveis, prejudicando a qualidade do serviço bem como a continuidade do mesmo.

Para contornar estes problemas se faz necessário examinar, com a devida antecedência, os inconvenientes que certas perturbações podem causar ao sistema. Esta necessidade deu origem modernamente ao desenvolvimento da função denominada Análise de Segurança, que tem como objetivo alertar a operação, com antecipação adequada, quanto às possibilidades de ultrapassagem de certos limites de produção transporte ou regulação.

2.2 - Análise de Segurança em Tempo Real

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 Contingências. Esta função pode ser executada para as condições previstas, automaticamente ou por solicitação do operador. Os resultados obtidos dos testes da Análise de Contingências revela 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.

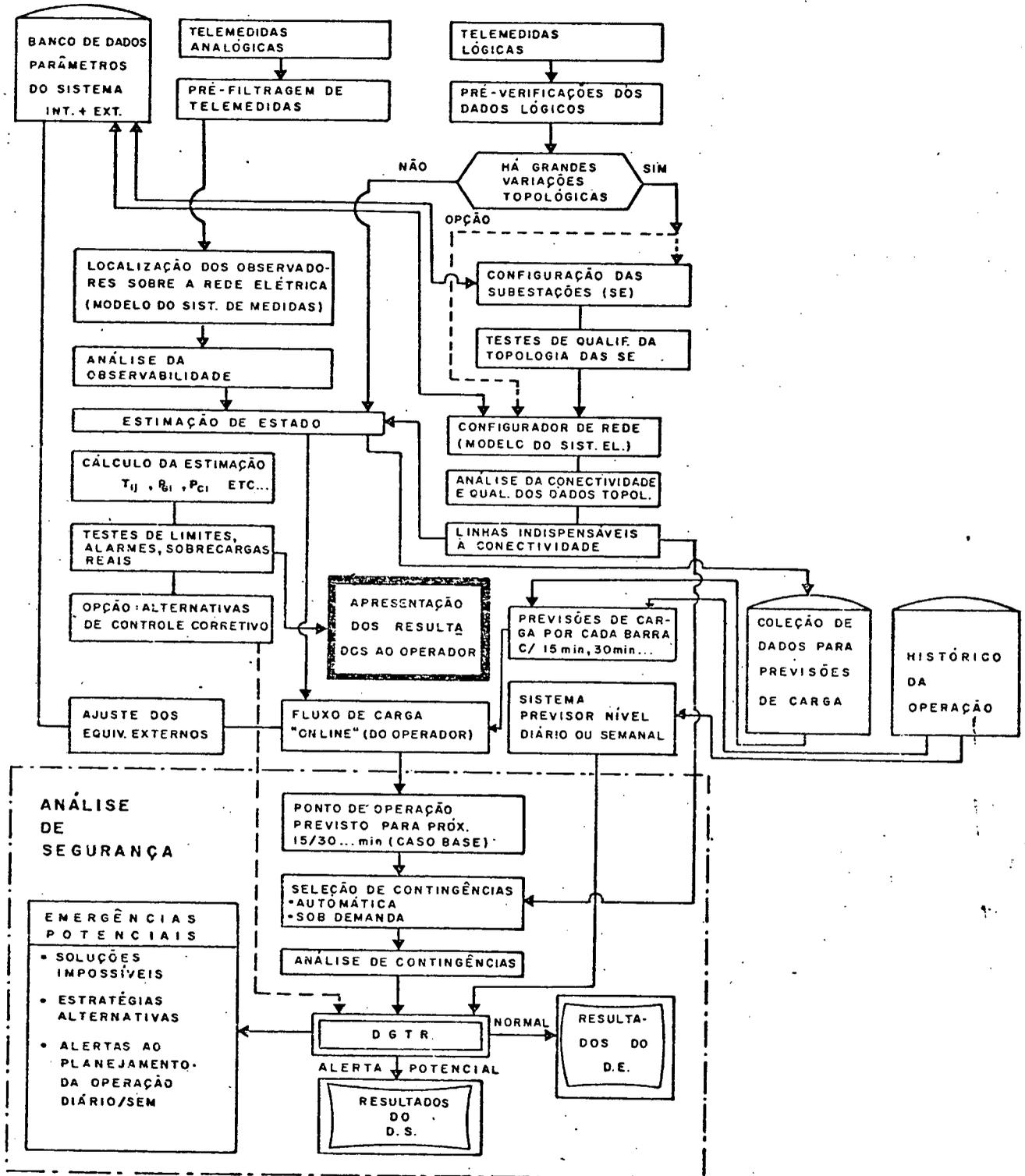


Figura 2.1 - Cadeia de Tratamentos em Tempo Real.

2.3 - Despacho de Geração 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 (DGTR) e atua tal como mostra a Figura (2.1).

O DGTR tal como apresentado por Guimarães [9] e Aguilar [8], é dividido em dois sub-problemas:

- O Despacho de Segurança (DS) e o
- Despacho Econômico (DE).

Estes subproblemas são definidos 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), tal como visto no item 2.2, se recorre ao Despacho de Segurança. Pode-se recorrer também ao Despacho de Segurança (como uma opção) quando se está diante de sobrecargas reais, detetadas logo após os cálculos que se apoiam nos resultados da Estimção 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:

- Repartição das potências entre as unidades geradoras e/ou
- Alívio de Carga.

Quando o Despacho de Segurança não encontrar solução possível que elimine tais sobrecargas se está diante de Emergências Potenciais (veja a Figura (2.1)).

2.4 - Mudanças na Topologia da Rede: Filosofia Adotada neste Trabalho

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. Neste trabalho são estudadas estas opções, procurando-se adotar uma filosofia de operação onde as manobras que mudam a topologia da rede são a última alternativa a ser adotada pelo operador. É por esta razão que só se propõe estudar ações de controle através de mudanças na topologia da rede, para alívio de sobrecargas, para os casos declarados críticos pelo DGTR. Na Figura (2.2) é mostrado como as ações alternativas de controle via mudanças na topologia da rede, visando o alívio de sobrecarga, serão consideradas dentro dos estudos feitos na Análise de Segurança em Tempo Real, segundo a filosofia aqui proposta.

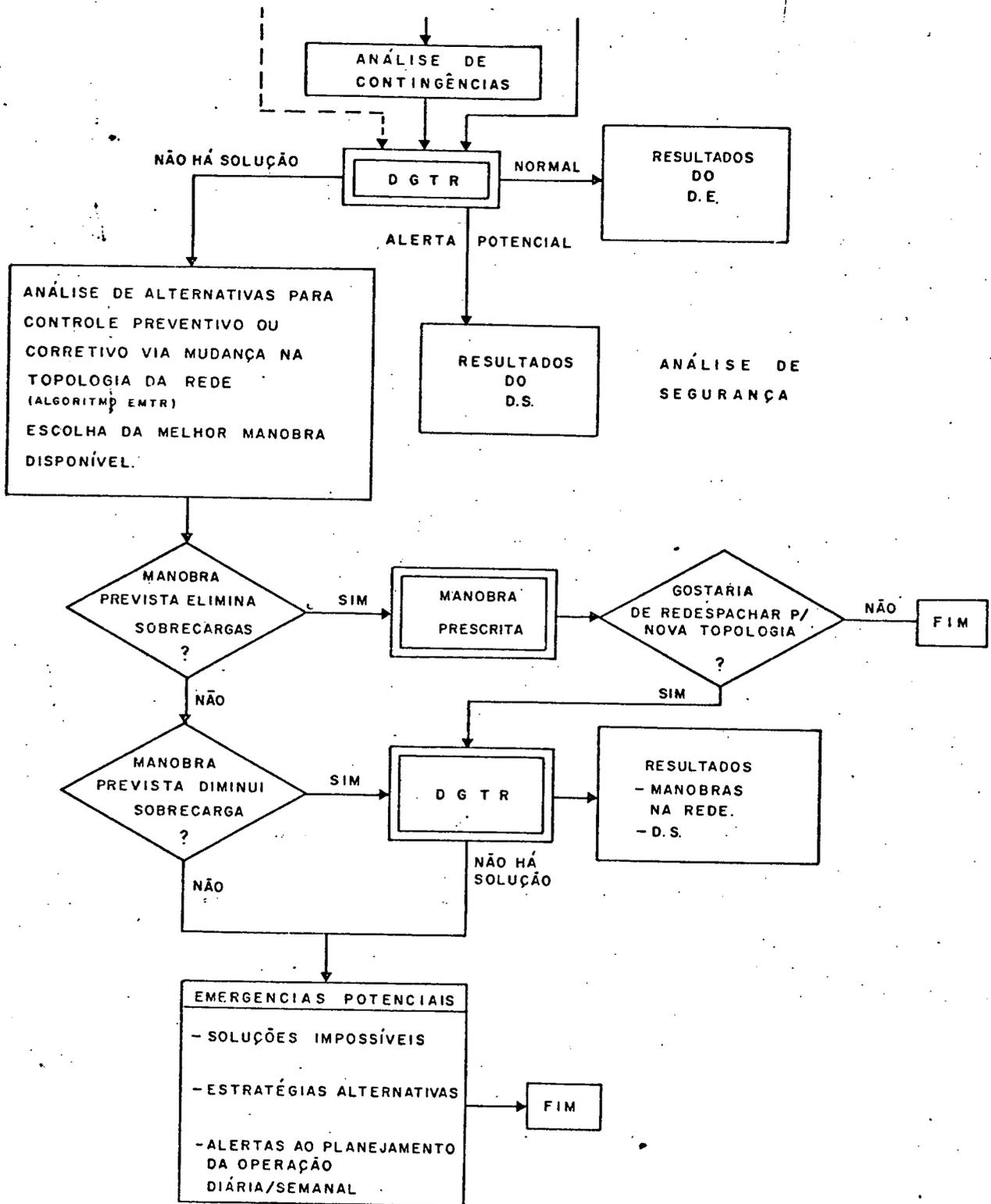


Figura 2.2 - Análise de Alternativas de Controle através de Mudanças na Topologia da Rede na Cadeia de Tratamentos em Tempo Real.

2.5 - Comentários

Neste Capítulo apresenta-se, com o intuito de si tuar o trabalho, a Análise de Segurança dentro da Cadeia de Tra tamentos em Tempo Real, dando-se ênfase a sua função Despacho de Geração em Tempo Real.

Mostra-se também a forma como se utiliza o DGTR, quando projetado para atuar completando a Análise de Segurança em Tempo Real.

Finalmente é apresentada a filosofia seguida, den tro da Análise de Segurança em Tempo Real, para incluir os estu dos de estratégias alternativas de controle via mudanças na topo logia da rede, visando contornar casos de sobrecargas reais ou sobrecargas potenciais, para os quais a função Despacho de Segu rança do DGTR, [8, 9], não apresenta solução possível via ações de redespacho e alívio de carga.

C A P Í T U L O 3

MUDANÇAS NA TOPOLOGIA DA REDE VISANDO O ALÍVIO DE SOBRECARGA NA ANÁLISE DE SEGURANÇA EM TEMPO REAL

3.1 - Introdução

No Capítulo 2 foi visto que, uma vez atingido o estado Normal-Alerta (Inseguro), se recorre ao Despacho de Segurança para estudar as possíveis variações de produção, através de redespacho, ou então alívios de carga interruptíveis visando eliminar sobrecargas na rede. Entretanto, existem determinadas sobrecargas reais, ou sobrecargas potenciais, que não se conseguem ver eliminadas através do DS.

Para tentar encontrar uma solução para estes casos se propõe estudar ações de controle alternativo via mudanças na topologia da rede para alívio de sobrecargas.

Em recentes trabalhos [12, 13, 14, 15], têm sido estudadas alternativas de controle via mudanças na topologia da rede para alívio de sobrecargas como ações de controle corretivo nos sistemas de potência.

Na referência [12] Mazi e outros fazem uma seleção de todos os circuitos que possam ser chaveados para tentativas de alívios de sobrecarga. Esta seleção é feita através do cálculo de fatores de sensibilidade lineares (fatores de distribuição) baseados no modelo CC (fluxo de carga CC) da rede elétrica. Estes fatores são calculados usando elementos da matriz tipo impedância nodal; ou seja, a inversa da matriz tipo admitância nodal,

B (ver Apêndice A), do fluxo de carga CC e das reatâncias dos ramos da rede. Neste caso, a manobra na rede é considerada como a única possível ação de controle para alívio de sobrecargas. Não são consideradas ações através de redespacho e/ou cortes de carga que poderiam vir a complementar as manobras na rede para tentar o alívio das sobrecargas.

Em [13] o problema é formulado utilizando um modelo de programação linear, onde a função a minimizar ou maximizar é função das correntes nodais (injeções nodais) e estas, por sua vez, são linearmente dependentes das injeções de correntes complexas nos nós terminais dos elementos chaveados.

Estas injeções (de compensação) são calculadas, como em [12], através dos cálculos de fatores de distribuição, com a diferença de que estes cálculos são baseados num fluxo de carga AC. O maior inconveniente deste procedimento é que, para cada saída de linha, tem que ser realizado um fluxo de potência AC para o cálculo dos fatores de distribuição, como condição necessária para dar partida ao problema de programação linear. Caso este fluxo não obtenha convergência, o processo falha.

Nas referências [14] e [15] o problema, devido à natureza discreta dos chaveamentos, é formulado como sendo um problema de programação (linear) mista. Para cada manobra realizada é calculado um limite (bound) através de uma função objetivo baseada no redespacho e no risco de racionamentos de carga.

Esta é uma forma conveniente de tratar o problema, principalmente considerando sua natureza intrínseca. Entretanto, o caminho adotado pelos autores consiste em estudar as alternativas de mudanças na topologia incluindo previamente um redespacho e/ou corte de carga, conforme fica explicitado na fun

ção objetivo adotada e no algoritmo implantado, o que conduz a um esforço de cálculo exagerado e inconveniente no caso de aplicações em tempo real. Por outro lado, as precisões dos cálculos, que estão condicionadas às aproximações realizadas por conta das linearizações, podem ser aceitas se os resultados forem devidamente verificados quanto a sua viabilidade no final de todos os estudos através de um fluxo de carga AC completo.

Neste trabalho acompanha-se a mesma linha de raciocínio quanto à formulação e apresentação do problema. Entretanto, procura-se adotar uma filosofia, na busca dos resultados, que afina melhor com a intuição e onde prevalece o sentimento da operação, que prescreve a manobra sobre a topologia da rede como última alternativa a ser adotada, levando em conta os altos riscos em utilizá-la.

Basicamente a solução do problema, como será visto, é conduzida, pelo princípio da decomposição de um problema de programação linear mista (PPLM), em dois níveis, como segue:

Primeiro Nível de Decomposição:

Encontrar a manobra m_i (caso de alterações simples adição ou retirada) ou o subconjunto de manobras $\{m\}$ (caso alterações múltiplas/adicação) que, dentre todas as manobras possíveis $\{N\}$, mais contribue para o alívio ou eliminação das sobrecargas, para uma determinada condição de operação.

Segundo Nível de Decomposição:

Para a manobra m_i ou o conjunto de manobras $\{m\}$

obtidas como solução no primeiro nível, verificar se ainda per sistem sobrecargas.

Caso persistam ainda sobrecargas, só a manobra m_i (ou o conjunto de manobras $\{m\}$) não é (são) suficiente(s) para eliminar as violações dos limites operacionais de certos elementos da rede e, nesse caso, se deve verificar se a aplicação do redespacho de geração, em primeira instância, e do alívio de carga, em segunda, é capaz ou não de eliminar estas sobrecargas.

Se nesse nível não é encontrada uma solução possível, o caso que já era considerado crítico, requer um tratamento mais drástico, como recorrer aos limites de emergência etc [11].

A remoção ou adição de circuitos, manobras estas que permitem alterar a topologia da rede, serão baseadas ao Teorema da compensação [6], sendo a rede elétrica modelada através do fluxo de carga CC.

3.2 - Formulação do Modelo de Mudanças na Topologia da Rede

Na formulação proposta para descrever as alterações na topologia, a rede elétrica é representada por um modelo de fluxo de carga CC, como mostrado no Apêndice A, e a adição/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 circuito 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.

Já que neste trabalho se está representando a rede através do Fluxo de Carga CC todo o desenvolvimento a seguir será baseado neste modelo.

3.2.1 - Aplicação do Teorema da Compensação a Situação nas quais Ocorrem Alterações Simples (um ramo por vez)

Considere uma rede elétrica descrita por (A-11).

(ver Apêndice A):

$$\underline{P} = B \underline{\theta} \quad (3.1)$$

A alteração na reatância de um ramo qualquer ocasiona a alteração na matriz B (tipo admitância nodal), que por

\underline{a}_{im} = Vetor de dimensão m , constituído de zeros, com exceção dos elementos correspondentes aos nós i e m que valem, respectivamente, $+1$ e -1 .

\underline{a}_{im}^t = Transposto do vetor \underline{a}_{im} .

Tem-se:

$$\underline{a}_{im} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ i \\ \cdot \\ \cdot \\ m \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ NB-1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ +1 \\ \cdot \\ \cdot \\ -1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Substituindo (3.5) em (3.3), obtém-se:

$$\underline{\Delta\theta} = -[B^0]^{-1} \Delta B_{im} \underline{a}_{im} \underline{a}_{im}^t (\underline{\theta}^0 + \underline{\Delta\theta}) \quad (3.7)$$

Considere-se um ramo ($i - m$) qualquer de uma rede elétrica, tal como mostra a Figura (3.1):

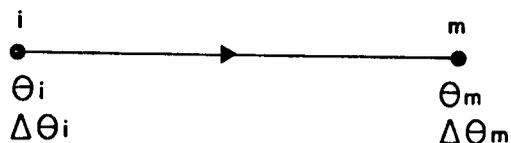


Figura 3.1 - Variação dos Estados nas Barras Terminais do Circuito ($i - m$).

O vetor \underline{a}_{im} pode ser representado segundo as convenções usuais de incidência do grafo de rede, por:

$$\underline{a}_{im} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \begin{matrix} i \\ m \end{matrix} \quad (3.8)$$

Da mesma forma, os vetores $\underline{\theta}$ e $\underline{\Delta\theta}$ são respectivamente:

$$\underline{\theta} = \begin{bmatrix} \theta_i \\ \theta_m \end{bmatrix} \begin{matrix} i \\ m \end{matrix} \quad (3.9)$$

$$\underline{\Delta\theta} = \begin{bmatrix} \Delta\theta_i \\ \Delta\theta_m \end{bmatrix} \begin{matrix} i \\ m \end{matrix} \quad (3.10)$$

Fazendo-se os produtos:

$$\underline{a}_{im}^t \underline{\theta} = \begin{matrix} i & m \\ [1 & -1] \end{matrix} \begin{matrix} i \\ m \end{matrix} \begin{bmatrix} \theta_i \\ \theta_m \end{bmatrix} = \theta_i - \theta_m \quad (3.11)$$

e

$$\underline{a}_{im}^t \underline{\Delta\theta} = \begin{matrix} i & m \\ [1 & -1] \end{matrix} \begin{matrix} i \\ m \end{matrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_i \\ \Delta\theta_m \end{bmatrix} = \Delta\theta_i - \Delta\theta_m \quad (3.12)$$

pode-se escrever que:

$$\underline{a}_{im}^t (\underline{\theta}^0 + \underline{\Delta\theta}) = (\theta_i^0 - \theta_m^0) + (\Delta\theta_i - \Delta\theta_m) \quad (3.13)$$

Como

$$\theta_i^0 - \theta_m^0 = \theta_{im}^0 \quad (3.14)$$

e

$$\Delta\theta_i - \Delta\theta_m = \Delta\theta_{im} \quad (3.15)$$

então se tem que:

$$\underline{a}_{im}^t \cdot (\underline{\theta}^0 + \underline{\Delta\theta}) = (\theta_{im}^0 + \Delta\theta_{im}) \quad (3.16)$$

logo:

$$\underline{\Delta\theta} = -[B^0]^{-1} \underline{a}_{im} \Delta B_{im} (\theta_{im}^0 + \Delta\theta_{im}) \quad (3.17)$$

A equação (3.17) relaciona a variação dos defasamentos angulares nas outras barras em função do defasamento angular entre as barras i e m ($\Delta\theta_{im}$), após a alteração na reatância do circuito ($i - m$).

Para que $\underline{\Delta\theta}$ fique inteiramente determinado é preciso calcular $\Delta\theta_{im}$. Isso pode ser feito pré-multiplicando-se (3.17) por \underline{a}_{im}^t :

$$\Delta\theta_{im} = -\underline{a}_{im}^t [B^0]^{-1} \underline{a}_{im} (\Delta B_{im} \theta_{im}^0 + \Delta B_{im} \Delta\theta_{im}) \quad (3.18),$$

sendo que

$$x_{im}^{eq} = \underline{a}_{im}^t [B^0]^{-1} \underline{a}_{im} = X_{ii} + X_{mm} - 2X_{im} \quad (3.19),$$

onde:

$$x_{im}^{eq} = \text{reatância equivalente entre os nós } i \text{ e } m.$$

Resolvendo (3.18) obtêm-se:

$$\Delta\theta_{im} = - \frac{x_{im}^{eq} \cdot \Delta B_{im} \cdot \theta_{im}^0}{1 + x_{im}^{eq} \Delta B_{im}} \quad (3.20)$$

Substituindo (3.20) em (3.17) se obtém:

$$\underline{\Delta\theta} = -[B^0]^{-1} \underline{a}_{im} \cdot \Delta B_{im} \left[\theta_{im}^0 - \frac{x_{im}^{eq} \cdot \Delta B_{im} \cdot \theta_{im}^0}{1 + x_{im}^{eq} \cdot \Delta B_{im}} \right] \quad (3.21)$$

Desenvolvendo (3.21) se tem:

$$\underline{\Delta\theta} = -[B^0]^{-1} \underline{a}_{im} \cdot \left(\frac{\Delta B_{im} \theta_{im}^0}{1 + x_{im}^{eq} \Delta B_{im}} \right) \quad (3.22)$$

Comparando (3.22) com (A-23) do Apêndice A, verifica-se que a expressão:

$$\frac{\Delta B_{im} \cdot \theta_{im}^0}{1 + x_{im}^{eq} \Delta B_{im}} \quad (3.23),$$

pode ser interpretada como uma injeção de compensação aplicada

às barras terminais do circuito (i - m).

A correção $\Delta\theta$, no vetor do estado do sistema elétrico, devido a modificação da admitância de um circuito qualquer (i - m), pode ser utilizada para determinar o novo estado da rede. Este estado é obtido através do modelo linear (sistema de equações lineares) com a matriz B inalterada e o termo independente (P) modificado através da inclusão de injeções de compensação apropriadas nas barras terminais do circuito (i - m).

3.2.1.a - Remoção de um Circuito Qualquer (i - m)

Para remoção de um circuito têm-se:

$$\Delta B_{im} = - x_{im}^{-1} \quad e$$

$$\Delta\theta_{im} = - \frac{x_{im}^{eq} [-x_{im}^{-1} \theta_{im}^o]}{1 - x_{im}^{-1} x_{im}^{eq}} \quad (3.24)$$

O defasamento angular entre as barras i e m, após a remoção do circuito (i - m), é expresso por:

$$\theta_{im} = \theta_{im}^o + \Delta\theta_{im} \quad (3.25)$$

Entrando com (3.24) em (3.25), se obtém:

$$\theta_{im} = \frac{\theta_{im}^o}{1 - x_{im}^{-1} x_{im}^{eq}} \quad (3.26)$$

O tr nsito fict cio no circuito (i - m) ap s a simula o de sua remo o   expresso por:

$$P_{im} = x_{im}^{-1} \left[\frac{\theta_{im}^0}{1 - x_{im}^{-1} x_{im}^{eq}} \right] \quad (3.27)$$

As inje es de compensa o nas barras terminais i e m s o dadas por (ver Figura (3.2)):

$$I_{ci} = - I_{cm} = P_{im} \quad (3.28)$$

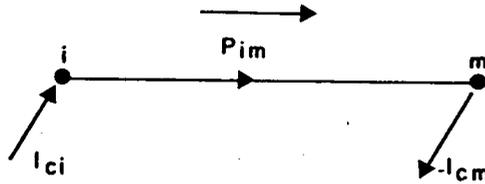


Figura 3.2 - Inje es de Compensa o que Simulam a Retirada do Circuito (i - m).

O valor fict cio do tr nsito no circuito (i - m),   igual ao valor da inje o de compensa o, ap s a simula o de sua remo o.

3.2.1.b - Adi o de um Circuito Qualquer (i - m)

Para a adi o de um circuito (i - m) tem-se que:

$$\Delta B_{im} = x_{im}^{-1} \quad e$$

$$\Delta \theta_{im} = \frac{-x_{im}^{eq} [x_{im}^{-1} \theta_{im}]}{1 + x_{im}^{-1} x_{im}^{eq}} \quad (3.29)$$

O defasamento angular entre as barras i e m após a adição do circuito $(i - m)$ é expresso por:

$$\theta_{im} = \theta_{im}^0 + \Delta \theta_{im} \quad (3.30)$$

Entrando com (3.29) em (3.30) obtém-se:

$$\theta_{im} = \frac{\theta_{im}^0}{1 + x_{im}^{-1} x_{im}^{eq}} \quad (3.31)$$

O trãnsito no circuito $(i - m)$ após a simulação de sua adição é expresso por:

$$P_{im} = x_{im}^{-1} \left[\frac{\theta_{im}^0}{1 + x_{im}^{-1} x_{im}^{eq}} \right] \quad (3.32)$$

As injeções de compensação nas barras terminais i e m são dadas por (ver Figura (3.3)):

$$I_{ci} = - I_{cm} = - P_{im} \quad (3.33)$$

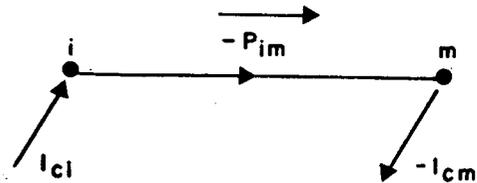


Figura 3.3 - Injeções de Compensação que Simulam a Adição do Circuito (i - m).

A magnitude da injeção de compensação, que simula a adição do circuito (i - m), e o trânsito no mesmo circuito após a sua adição são iguais em módulo, porém de sinais contrários.

3.2.2 - Aplicação do Teorema da Compensação a Situações nas quais Ocorrem Alterações Múltiplas (n ramos simultaneamente)

As expressões obtidas anteriormente para a situação de alterações simples podem ser generalizadas para o caso de alterações múltiplas; ou seja, quando ocorrem variações simultâneas nas admitâncias de vários ramos da rede [6].

Da mesma forma que para alterações simples, se tem que, dada uma rede elétrica representada por (A-11) (ver A pêndice A),

$$\underline{P} = B \underline{\theta} \quad (3.34),$$

alterando-se a matriz B convenientemente, tem-se que:

$$\underline{P} = [B + \Delta B] [\underline{\theta}^0 + \underline{\Delta\theta}] \quad (3.35)$$

Como $\underline{P} = B \underline{\theta}^0$, substituindo em (3.35) se obtém:

$$\underline{\Delta\theta} = -[B]^{-1} \Delta B [\underline{\theta}^0 + \underline{\Delta\theta}] \quad (3.36)$$

Analogamente ao que ocorre no caso unidimensional, a matriz ΔB pode ser expressa como:

$$\Delta B = M \Delta y M^t \quad (3.37),$$

onde:

M - matriz de dimensão (NM x NB),

NM - número de modificações e

NB - número de barras.

Substituindo (3.37) em (3.35) resulta que:

$$[B + M \Delta y M^t] [\underline{\theta}^0 + \underline{\Delta\theta}] = \underline{P} \quad (3.38)$$

Aplicando o Lema de Inversão de Matrizes, que relaciona a inversa da matriz admitância nodal e a inversa desta matriz após as modificações nas admitâncias dos circuitos, para resolver (3.38), tem-se que:

$$B_N = B + M \cdot \Delta y \cdot M^t \quad (3.39)$$

Pós-multiplicando (3.39) por B^{-1} , obtém-se:

$$B_N \cdot B^{-1} = BB^{-1} + M \cdot \Delta y \cdot M^t \cdot B^{-1} \quad (3.40)$$

Pré-multiplicando (3.40) por B_N^{-1} , obtém-se agora:

$$B_N^{-1} B_N B^{-1} = B_N^{-1} I + B_N^{-1} M \Delta y M^t B^{-1} \quad (3.41)$$

onde:

I - matriz identidade.

Pós-multiplicando (3.41) por $M \cdot \Delta y$, o resultado é:

$$B^{-1} M \Delta y = B_N^{-1} M \Delta y + B_N^{-1} \Delta y M^t B^{-1} M \Delta y \quad (3.42)$$

Colocando em evidência $B_N^{-1} M \Delta y$, chega-se a:

$$B^{-1} M \Delta y = B_N^{-1} M \Delta y [I + M^t B^{-1} M \Delta y] \quad (3.43)$$

Pós-multiplicando (3.43) por $[I + M^t B^{-1} M \Delta y]$, resulta que:

$$B^{-1} M \Delta y [I + M^t B^{-1} M \Delta y]^{-1} = B_N^{-1} M \Delta y \quad (3.44)$$

Pós-multiplicando (3.44) por $M^t B^{-1}$, obtém-se então:

$$B_N^{-1} M \Delta y M^t B^{-1} = B^{-1} M \Delta y [I + M^t B^{-1} M \Delta y]^{-1} M^t B^{-1} \quad (3.45)$$

Substituindo em (3.41), tem-se:

$$B^{-1} = B_N^{-1} + B^{-1} M \Delta y [I + M^t B^{-1} M \Delta y]^{-1} M^t B^{-1} \quad (3.46),$$

levando ao seguinte resultado:

$$B_N^{-1} = B^{-1} - B^{-1} M [\Delta \bar{y}^{-1} + \Delta y^{-1} M^t B^{-1} M \Delta y]^{-1} M^t B^{-1} \quad (3.47)$$

Sabe-se que:

$$\underline{\Delta \theta} = B^{-1} \underline{I_C} \quad (3.48),$$

onde:

$\underline{I_C}$ = Vetor das injeções de compensação que simulam a retirada ou adição de circuitos na rede.

Logo:

$$\underline{\Delta \theta} = B_N^{-1} \underline{P} - B^{-1} \underline{P} \quad (3.49)$$

e então:

$$\underline{\Delta \theta} = \{B^{-1} - B^{-1} M [\Delta \bar{y}^{-1} + \Delta y^{-1} M^t B^{-1} M \Delta y]^{-1} M^t B^{-1}\} - B^{-1} \underline{P} \quad (3.50)$$

Desenvolvendo (3.50) obtém-se:

$$\underline{\Delta \theta} = - B^{-1} M [\Delta \bar{y}^{-1} + \Delta y^{-1} + M^t B^{-1} M \Delta y]^{-1} M^t \underline{\theta^0} \quad (3.51)$$

com o que finalmente se consegue calcular:

$$\underline{I}_C = - M [\Delta y + M^t B^{-1} M]^{-1} M^t \underline{\theta}^o \quad (3.52)$$

(ver Monticelli, [6]).

Portanto, alterações múltiplas na rede elétrica podem ser simuladas através da adição de injeções de compensação nas barras terminais dos circuitos a serem adicionados ou removidos. Como no caso de alterações simples, os valores das injeções de compensação que simulam a remoção ou adição de circuitos, são iguais aos trânsitos nestes circuitos.

3.2.3 - Expressão dos Trânsitos em Função das Injeções de Compensação

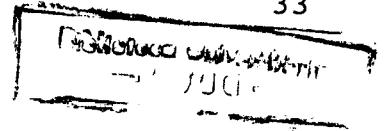
Antes de desenvolver a formulação básica para o tratamento do problema proposto, é interessante que se examine melhor a influência das injeções de compensação, que simulam a adição ou remoção de circuitos, sobre os trânsitos no resto dos elementos da rede elétrica.

No modelo de Fluxo de Carga CC a equação da rede, como mostrado no Apêndice A, é dada por:

$$\underline{P} = B \underline{\theta} \quad (3.53)$$

Aplicando o Teorema da Compensação, a variação na injeção líquida numa barra pode ser expressa por:

$$\underline{\Delta P} = (\underline{P}_G - \underline{P}_C) + H \underline{I}_C \quad (3.54),$$



onde:

\underline{P}_G = vetor das injeções de gerações de potência ativa.

\underline{P}_C = vetor das injeções de carga de potência ativa.

\underline{I}_C = vetor das injeções de compensação de potência ativa.

H = matriz de incidência barra-injeção de compensação. Cada linha de H é composta de zeros a exceção das posições correspondentes às barras terminais do circuito associado a injeção de compensação, que valem respectivamente 1 e -1.

De (A-19) (ver Apêndice A) se tem que:

$$\underline{T} = \gamma \underline{\phi} \quad (3.55)$$

onde:

\underline{T} = vetor dos trânsitos de potência ativa nos ramos;

γ = matriz diagonal cujos elementos são as susceptâncias primitivas dos ramos;

$\underline{\phi}$ = vetor das aberturas angulares dos ramos da rede;

e de (A-21) se conhece que:

$$\underline{\phi} = A \cdot \underline{\theta} \quad (3.56)$$

onde:

A = matriz de incidência dos ramos nos nós da rede excluindo o nó de referência.

Substituindo (5.56) em (3.55), obtém-se:

$$\underline{T} = \gamma A \underline{\theta} \quad (3.57)$$

Sabe-se que após a aplicação do Teorema da Compensação tem-se:

$$\underline{\Delta P} = B \underline{\theta} \quad (3.58)$$

de onde resulta que:

$$\underline{\theta} = B^{-1} \underline{\Delta P} \quad (3.59)$$

Substituindo (3.59) em (3.57) consegue-se escrever que:

$$\underline{T} = \gamma A B^{-1} \underline{\Delta P} = S \underline{\Delta P} \quad (3.60)$$

onde:

$$\gamma A B^{-1} = S.$$

Substituindo agora (3.54) em (3.60) encontra-se finalmente a relação:

$$T = S \left[\underline{P}_G - \underline{P}_C + H \underline{I}_C \right] \quad (3.61),$$

que é a expressão linearizada dos triângulos em função das injeções nas barras e das injeções de compensação.

3.3 - Formulação do Problema de Mudanças na Topologia da Rede Visando o Alívio de Sobrecargas

Neste item será apresentada uma formulação para o problema de mudanças na topologia da rede para o alívio de sobrecargas que, como mencionado na introdução, será conduzida, pelo princípio da decomposição em dois níveis.

3.3.1 - Problema de Primeiro Nível: Determinação da Melhor Alternativa de Mudança Topológica da Rede

Antes de apresentar a formulação deste sub-problema, seguem-se as seguintes definições:

{m} - Conjunto de manobras possíveis.

{L} - Subconjunto do conjunto dos elementos (circuitos da rede elétrica, formado pelos elementos (circuitos) que podem ser chaveados.

m_i - manobra simples i , com $i = 1, \dots, |\{L\}|$.

$\{m\}$ - Subconjunto de manobras múltiplas.

Considerar-se-á neste contexto, que a rede em estudo é uma rede malhada, que consite de um grafo:

$$G = (x, U) \quad (3.62)$$

onde:

x - Conjunto de nós do grafo

U - Conjunto dos arcos do grafo,

e onde o Conjunto X permanecerá constante. Isto é, não serão consideradas manobras que conduzam a desdobra^{mento} ou condensações de nós, tal como admitido em [12] e [13].

O sub-problema do primeiro nível, como mencionado na introdução, consiste em encontrar a manobra $m_i \subseteq \{N\}$, ou $\{m\} \subseteq \{N\}$, que mais alivia o nível de sobrecargas da rede.

O nível de sobrecargas de rede é medido pelo seguinte funcional linear:

$$ZY = \sum_{i=1}^{NLSC} SC_i \quad (3.63),$$

onde:

$$SC_i = |\bar{T}_i - |T_i|| \quad (3.64)$$

Assim sendo, então se tem que:

$$ZY = \sum_{i=1}^{NLSC} |\bar{T}_i - |T_i|| \quad (3.65)$$

onde:

\bar{T}_i = Trânsito máximo nos elementos (circuitos) i ,

T_i = Trânsitos nos elementos (circuitos) i ,

NLSC = Número de elementos sobrecarregados, pertencentes a um conjunto $\{L_{SC}\}$ que é o conjunto de todos os elementos que apresentam sobrecargas numa dada situação operacional.

NLSC e $\{L_{SC}\}$ são, por hipótese, conhecidos para a situação operacional estudada.

Na prática NLSC e $\{L_{SC}\}$ são determinados nas seguintes situações:

- a) Após a detecção de sobrecargas reais via monitoração da segurança em tempo real;
- b) À saída da análise de contingências, quando estão associados a sobrecargas potenciais (na operação em tempo real e no planejamento da transmissão) e

c) Associados às soluções impossíveis do Despacho de Geração em Tempo Real (DGTR) (na análise de segurança em tempo real, no planejamento à nível diário/semanal, nos estudos de variações topológicas da rede para acompanhamento da operação diária/semanal, etc).

Desenvolvendo (3.61) resulta que:

$$\underline{T} = S (\underline{P}_G - \underline{P}_C) + S H \underline{I}_C \quad (3.66)$$

Definindo:

$$\underline{T}^O = S^O (\underline{P}_G^O - \underline{P}_C^O) \quad (3.67)$$

e

$$\underline{\Delta T} = R \underline{I}_C \quad (3.68)$$

onde:

$$R = S \cdot H \quad (3.69),$$

então, o trânsito, logo após um chaveamento, é dado por:

$$\underline{T} = \underline{T}^O + \underline{\Delta T} \quad (3.70).$$

Pode-se agora escrever que:

$$T_i = T_i^O + \Delta T_i \quad (3.71)$$

$$\{(\underline{V}_i), | i = 1, \dots, NLSC\}$$

onde:

T_i = trânsito no elemento i após a adição ou remoção de um elemento da rede,

T_i^O = trânsito inicial para a situação operacional examinada e

ΔT_i = variação do trânsito no elemento i logo após a adição ou remoção de um elemento do conjunto $\{L\}$.

Substituindo (3.71) em (3.65) o funcional linear passa a ser:

$$ZY = \sum_{i=1}^{NLSC} |\bar{T}_i - |T_i^O + \Delta T_i|| \quad (3.72)$$

sendo que:

$$T_i^O = S_{ij}^O P_j^O \quad (3.73)$$

$\{(\forall_i), |i = 1, \dots, NLSC\}$ e

$\{(\forall_j), |j = 1, \dots, NB-1\}$

é o trânsito inicial na rede para a situação operacional examinada, onde:

S_{ij}^O = elemento da matriz S , matriz que relaciona as injeções de potência ativa com os fluxos nas linhas,

e

$$\Delta T_i = R_{il} I_{cl} \delta_\ell \quad (3.74)$$

$$\{(\Psi_i), |i = 1, \dots, \text{NLSC}\} \quad e$$

$$(\Psi_\ell), |\ell = 1, \dots, |\{N\}| \}$$

a variação no trânsito logo após um chaveamento.

Nesta última expressão:

R_{il} - elemento da matriz R , matriz que relaciona as injeções de compensação com os fluxos nas linhas e

δ_ℓ - variáveis que assumem valores 0 e 1.

Finalmente o sub-problema do primeiro nível pode ser formulado como:

$$\min ZY = \left\{ \sum_{i=1}^{\text{NLSC}} |\bar{T}_i - |T_i^O| | - \sum_{i=1}^{\text{NLSC}} \sum_{\ell=1}^{|\{N\}|} |R_{il} I_{cl} \delta_\ell| \right\} \quad (3.75)$$

sujeito a:

$$|R_{il} I_{cl} \delta_\ell| \leq |\bar{T}_i - |T_i^O| | \quad (3.76)$$

$$\delta_\ell = \begin{cases} 1 = \text{manobra } m_i \text{ ativada} \\ 0 = \text{manobra } m_i \text{ desativada} \end{cases} \quad (3.77)$$

$$\{(\Psi_i), |i = 1, \dots, \text{NLSC}\} \wedge \{(\Psi_\ell), |\ell = 1, \dots, |\{N\}| \}$$

onde ZY é a função objetivo linear modificada pela introdução das variáveis δ_ℓ , do tipo "Zero - Um" (0, 1), usando o teorema da compensação [6] para simular o efeito do chaveamento (adição ou retirada) de um elemento qualquer de $\{L\}$ sobre a distribuição dos fluxos na rede.

Este sub-problema é um problema de Programação Linear Inteira do tipo zero-um [2, 3, 4] tendo em vista a natureza das restrições (3.77), que ou estão ativas ($\delta_\ell = 0$) ou inativas ($\delta_\ell = 1$). Isto é, uma manobra m_i é realizada (1) ou não (0).

Considerando que existem várias manobras possíveis em $\{N\}$, então é evidente que o problema adquire um caráter combinatório, consistindo das várias maneiras de combinar as m_i manobras em subconjuntos $\{m\}$ de manobras de cardinal p , onde $p = 1, \dots, \text{cardinal } \{N\}$.

No próximo Capítulo será apresentada a formulação matemática do problema (3.75), (3.76) e (3.77) em termos de um problema de Programação Linear Inteira bem como a técnica de solução do tipo de Separação e Avaliação Progressiva adotada para resolvê-lo.

A solução do sub-problema do primeiro nível é m_i^* ou $\{m\}^*$ que conduz ZY (3.75) a um mínimo valor ZY^* , significando a manobra (ou conjunto de manobras) dentre as $\{N\}$ possíveis que mais contribui (em) para o alívio de sobrecargas.

Com m_i^* ou $\{m\}^*$ determinados, numa iteração testa-se o valor de ZY :

- Se $ZY \leq \epsilon_{ZY} = 10^{-5}$, então não há sobrecargas e a (s) manobra (s) m_i^* ($\{m\}^*$) é (são) suficiente (s) para resolver

o problema, pois eliminam as sobrecargas que persistam. A solução foi encontrada. E se passa a analisar outro caso.

Após a aplicação de todas as manobras m_i ou $\{m\}$, escolhe-se a melhor manobra (ou conjunto de manobras) dentre elas, usando como critério de seleção o menor valor de ZY associado, e continua-se testando:

- Se $ZY > \epsilon_{ZY} = 10^{-5}$, então ainda persistem sobrecargas após a (s) manobra (s) m_i^* ($\{m\}^*$) e deve-se recorrer ao redespacho de geração, ou até ao alívio de cargas, no sentido de encontrar uma solução que as elimine. O sub-problema resultante é o problema do segundo nível descrito a seguir.

3.3.2 - Problema de Segundo Nível: Determinação dos Desvios de Geração e Alívios de Carga para a Nova Topologia Resultante após a (s) manobra (s) m_i^* ($\{m\}^*$)

O sub-problema que deve ser resolvido neste nível é um problema linear como mostrado por Aguilar [8], sendo formulado como segue:

$$\min Z = \sum_{i=1}^{NG} |P_{G_i} - P_{G_i}^o| + \sum_{j=1}^{NC} \alpha_j (P_{C_j}^o - P_{C_j}) \quad (3.78)$$

onde:

Z - função objetiva a ser minimizada;

$P_{G_i}^o$ - potência ativa gerada na barra de geração i na situação operacional examinada;

P_{G_i} - potência ativa a ser gerada na barra de geração i após o despacho;

- $P_{G_j}^o$ - potência ativa consumida na barra de carga j para a situação operacional examinada;
- P_{C_j} - potência ativa a ser consumida na barra de carga j após o despacho;
- α_j - fator de penalidade associado ao terno responsável pelo racionamento da barra de carga j ;
- NG - número de barras de geração e
- NC - número de barras de carga.

As restrições que complementam o sub-problema são:

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

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i (P_{G_i} - P_{C_i}) = \sum_{i=1}^N \lambda_i (P_{G_i}^o - P_{C_i}^o) \quad (3.79),$$

onde:

λ_i = perda diferencial de potência ativa associada à barra i .

N = número total de barras do sistema.

- b) Restrições referente aos limites de produção de potência ativa:

$$\underline{P_G}^{\min} \leq \underline{P_G} \leq \underline{P_G}^{\max} \quad (3.80)$$

- c) Restrições referentes aos limites de racionamento de carga:

$$\underline{P_C}^{\text{rac}} \leq \underline{P_C} \leq \underline{P_C}^o \quad (3.81)$$

onde:

\underline{P}_C^{rac} - vetor das cargas de potência ativa não interruptíveis.

d) Restrições referentes aos limites de Trânsito ativo nas linhas:

$$\underline{T}_i^{min} \leq \underline{T} \leq \underline{T}^{max} \quad (3.82)$$

$$\underline{T} = S (\underline{P}_G - \underline{P}_C) \quad (3.83)$$

onde:

\underline{T} - vetor dos trânsitos de potência ativa nos ramos.

\underline{T}^{min} - vetor dos limites mínimos de trânsito de potência ativa nos ramos.

\underline{T}^{max} - vetor dos limites máximos de trânsito de potência ativa nos ramos.

S - matriz que relaciona as injeções de potência ativa com os trânsitos nas linhas (ver Apêndice A).

A solução deste problema é obtido através de um algoritmo de Programação Linear usando o Método Simplex Modificado na forma revisada, combinado com as técnicas de relaxação, o qual explora a estrutura particular do problema acima formulado. Este programa denominado DGTR [8], pode ser utilizado de modo diferente em certas situações [10, 11].

Os resultados são os desvios de geração em torno

do ponto de operação básico, e, caso o redespacho não seja suficiente para eliminar as sobrecargas, os alívios de carga, determinados para as barras com cargas sob contrato de energia interruptível, são ativados.

- Caso o DGTR aponte ainda uma solução impossível então a situação é bastante crítica e só resta tentar buscar alternativas de controle corretivo usando o próprio DGTR, recorrendo aos valores limites de emergência [11].

3.4 - Conclusões

A aplicação do Teorema da Compensação para simular a adição e remoção de circuitos é de enorme importância no desenvolvimento do algoritmo adotado no presente trabalho, uma vez que permite refletir as alterações na rede (matriz B) através de variações apropriadas no termo independente (P), evitando assim a nova formação e fatoração da matriz B.

O método de solução proposto para resolver o problema de mudanças na topologia da rede visando o alívio de sobrecargas conduzido pelo princípio da decomposição em dois níveis, primeiro nível item 3.3.1 e segundo nível item 3.3.2, conjuntamente com a vantagem que decorre do uso do Teorema da Compensação torna possível a aplicação em tempo real, dentro da filosofia proposta, dos estudos de ações alternativas de controle via mudança na topologia da rede visando o alívio de sobrecargas, como pretende-se mostrar.

É importante ressaltar que o sub-problema do primeiro nível resultante da decomposição, devido ao fato que as ma

nobras na rede são ações de natureza discreta, tem que ser for
mulado como um problema de Programação Linear Inteira o qual po
derá ser resolvido com o auxílio de alguma das técnicas conhe
cidas para sua solução [2, 3, 4, 5].

C A P Í T U L O 4

FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE DETERMINAÇÃO DA MELHOR
ALTERNATIVA DE MUDANÇA TOPOLÓGICA DA REDE VIA PROGRAMAÇÃO
LINEAR INTEIRA. TÉCNICA DE SOLUÇÃO

4.1 - Introdução

Neste Capítulo apresenta-se uma breve recapitulação a cerca dos problemas de Programação Linear Inteira, que começa com a formulação típica de tais problemas, a natureza das restrições, das variáveis e função objetivo, no caso mais geral da Programação Linear Mista.

Em seguida apresenta-se a formulação dos problemas de Programação Linear Inteira do tipo zero-um (0 - 1), bem como um teorema que mostra de que maneira se pode transformar um problema de Programação Linear Inteira genérico em um problema de Programação Linear Inteira do tipo zero-um (0 - 1).

O problema de determinação da melhor alternativa de mudança topológica da rede é enquadrado dentro da formulação de um problema de Programação Linear Inteira do tipo zero-um (0 - 1) no item 4.3.1, enquanto que nos itens 4.4 e 4.5 são apresentadas as idéias básicas associadas às técnicas de Separação e Avaliação Progressiva ("Branch and Bound") e de Enumeração Implícita, respectivamente, que são geralmente usadas na construção de algoritmos para resolver problemas de Programação Linear Inteira do tipo zero-um (0 - 1).

Um algoritmo básico empregando a técnica de sepa-

ração e Avaliação Progressiva para resolver problemas de Programação Linear Inteira do tipo zero-um (0 - 1) é descrito no item 4.6 e, finalmente, no item 4.7 é apresentado o algoritmo aplicado ao sub-problema de determinação da melhor alternativa de mudança topológica da rede passo a passo, acompanhado de seu fluxograma.

As principais conclusões são objeto do item 4.8 que encerra este Capítulo.

4.2 - Problemas de Programação Linear Inteira

Cada vez que um problema possa ser colocado como a minimização (maximização) de uma função linear sujeita a restrições lineares, se está diante de um problema de Programação Linear.

Matematicamente um problema de Programação Linear (PL) tem a seguinte formulação, já bastante familiar [1]:

$$\min Z = \sum_{j=1}^n C_j x_j \quad (4.1)$$

sujeito a

$$a_{ij} x_j \geq b_i \quad (4.2)$$

$$\{\forall (i), \mid i = 1, \dots, m\}$$

e

$$x_j \geq 0 \quad (4.3),$$

onde x_j são variáveis desconhecidas; a_{ij} , b_i e C_j são constantes dadas. A função linear Z (4.1) que deve ser minimizada é chamada de função objetivo e as desigualdades (4.2) e (4.3) são chamadas de restrições.

Algumas vezes as desigualdades (4.2) e (4.3) podem-se apresentar como igualdades, quando então constituem restrições bastante mais severas. Em geral costuma-se dizer que as desigualdades são restrições brandas, enquanto que as igualdades são restrições duras.

Quando todas as variáveis x_j devem assumir valores inteiros num problema de programação linear, então se está diante de um problema de Programação Linear Inteira.

Classicamente um problema de Programação Linear pode apresentar-se numa forma mais geral como segue.

$$\min Z = \sum_{j=1}^n C_j x_j + \sum_{k=1}^{n'} d_k y_k \quad (4.4)$$

sujeito a

$$a_{ij} x_j + d_{ik} y_k \leq b_i \quad (4.5),$$

$$\{\forall (i), \mid i = 1, \dots, m\}$$

$$x_j \geq 0 \quad y_k \geq 0 \quad (4.6)$$

e

$$x_j \text{ inteiro} \quad (4.7)$$

onde x_j ($j = 1, \dots, n$) são variáveis inteiras; y_k ($k = 1, \dots, n'$) são variáveis reais contínuas; a_{ij} , C_j , d_{ik} , d_k e b_i são constantes reais dadas; Z (4.4) é a função objetivo linear e (4.5), (4.6) são as restrições. Este tipo de problema é conhecido como problema de Programação Linear Mista (PLM) [2, 3, 4].

Pode-se notar que, quando $n' = 0$, as variáveis reais contínuas y , desaparecem e o problema recai num problema de Programação Linear Inteira (PLI). Quando $n = 0$ as variáveis inteiras x_j desaparecem e o problema se enquadra na Programação Linear (PL) clássica.

Existem problemas de Programação Linear Inteira nos quais as variáveis x_j são restritas a assumir valores 0 e 1. Estes problemas são chamados de Problemas de Programação Linear Inteira do tipo zero-um [2, 3, 4, 5].

4.3 - Problemas de Programação Linear Inteira do Tipo Zero-Um

Muitos problemas de Programação Linear Inteira (PLI) possuem uma característica especial devido a que todas as variáveis inteiras são restritas a assumir dois valores, 0 ou 1. A razão pela qual estas variáveis de decisão são usadas reside na necessidade de indicação de quando alguma possível ação deve ser tomada ($x = 1$) ou não ($x = 0$), ou ainda para indicar mudança de um estado para outro. Por exemplo, se uma dada variável só

pode assumir valores \underline{a} e \underline{b} , pode-se atribuir 0 ao fato de \underline{a} atingir o nível (estado) \underline{a} e, nesse caso, 1 para indicar que \underline{a} está no nível (estado) \underline{b} . O teorema apresentado a seguir procura mostrar como isto, inclusive, pode ser generalizado.

Teorema 4.3.1:

Suponha um problema de Programação Linear Inteira (PLI) em que os limites das variáveis inteiras x_j são dados por $0 \leq x_j \leq u_j$ (onde u_j é um valor inteiro e positivo). Este problema pode ser colocado na forma de um problema de Programação Linear Inteira com variáveis 0 e 1.

Prova [3]

Substitua cada x_j por:

(i) $\sum_{a=1}^{u_j} t_{aj}$, onde as t_{aj} são variáveis 0 e 1, e omita a

restrição $0 \leq x_j \leq u_j$; ou por

(ii) $\sum_{a=0}^{l_j} 2^a t_{aj}$, onde as t_{aj} são variáveis 0 e 1 e l_j é um valor inteiro finito, tal que $\sum_{a=0}^{l_j} 2^a = 2^{l_j+1} - 1 \geq u_j$.

Então a restrição $0 \leq x_j \leq u_j$ pode ser colocada

na forma $x_j = \sum_{a=0}^{l_j} 2^a t_{aj} \leq u_j$. Portanto x_j pode assumir qualquer valor inteiro entre 0 e u_j como queria demonstrar-se.

Por exemplo:

Suponha que se tenha as seguintes restrições:

$$3 x_1 + x_2 \leq 25 \quad e$$

$$0 \leq x_1 \leq 6$$

Neste caso se tem que:

$u = 6$ e $l = 2$, verificando que

$$\sum_{a=0}^2 2^a = 2^3 - 1 \geq 6 \quad e \quad \sum_{a=0}^1 2^a = 2^2 - 1 < 6 \quad \text{então } x_1 \text{ pode}$$

ser substituído por:

$$\sum_{a=0}^2 2^a t_a = t_0 + 2 t_1 + 4 t_2, \text{ ou seja}$$

$x_1 = t_0 + 2 t_1 + 4 t_2$ onde t_0, t_1, t_2 assumem valores 0 e 1. Com isto a restrição $3 x_1 + x_2 \leq 25$ passa a ser colocada como sendo: $3 t_0 + 6 t_1 + 12 t_2 + x_2 \leq 25$ e x_1 pode assumir qualquer valor inteiro entre 0 e 6.

Pode-se observar que o tamanho do problema cresce dependendo do valor de u_j . O aumento do número de variáveis não torna atrativa esta transformação, excepto, talvez, para problemas em que u_j seja um número inteiro pequeno.

Neste trabalho se adotará 0 para indicar que um dado elemento (arco) do grafo da rede foi suprimido e 1 para indicar o contrário, significando que a transformação sugerida

pelo Teorema 4.3.1 é trivial e a formulação em termos da Programação Linear Inteira com variáveis 0 e 1 é evidentemente vantajosa.

4.3.1 - Formulação do Sub-Problema Determinação da Melhor Alternativa de Mudança Topológica da Rede, como uma Programação Linear Inteira do Tipo Zero-Um

No Capítulo anterior o problema de determinação da melhor alternativa de mudança topológica da rede, tal como apresentado no item 3.3.1, pode ser formulado como um problema de Programação Linear Inteira do tipo zero-um.

Assim, desde as expressões (3.75), (3.76) e (3.77) que são repetidas aqui por comodidade tem-se:

$$\min ZY = \left\{ \left| \sum_{i=1}^{NLSC} \bar{T}_i - |T_i^O| \right| - \sum_{i=1}^{NLSC} \sum_{l=1}^{|\{N\}|} |R_{il} I_{cl} \delta_l| \right\} \quad (3.75)$$

sujeita a

$$|R_{il} I_{cl} \delta_l| \leq | \bar{T}_i - |T_i^O| | \quad (3.76)$$

$$e \quad \delta_l = \begin{cases} 1 & - \text{manobra } m_i \text{ ativada} \\ 0 & - \text{manobra } m_i \text{ desativada} \end{cases} \quad (3.77)$$

$$\{\forall (i), |i = 1, \dots, NLSC\} \text{ e } \{\forall (l), |l = 1, \dots, |\{N\}|\}$$

Onde:

- ZY - função objetivo linear a ser minimizada;
- T_i^O - trânsito na linha i no ponto de operação estudado;
- \bar{T}_i - trânsito máximo permitido na linha i ;
- $|R_{il} I_{cl} \delta_l|$ - variação do trânsito na linha i logo após uma manobra m_i ;
- δ_l - variáveis restritas a assumir valores 0 e 1;
- NLSC - número de elementos (linhas) com sobrecarga;
- $\{N\}$ - número de manobras na rede.

Nota-se que esta formulação corresponde a um problema de Programação Linear Inteira do tipo zero-um em que as variáveis de decisão I_{cl} , associadas às variáveis binárias δ_l (0 e 1), são as injeções de compensação que resultam da manobra m_i ou o conjunto de manobras $\{m\}$.

Para solucionar este problema de Programação Linear Inteira existem algoritmos que empregam diferentes técnicas [2, 3, 4, 5,] , sendo que neste trabalho optou-se por um que emprega a técnicas de Separação e Avaliação Progressiva ("Branch and Bound") combinada com algumas idéias trazidas das técnicas de "Enumeração Implícita" [4], por parecer o caminho mais conveniente e eficaz para sua abordagem dentro da filosofia escolhida.

No itens 4.4 e 4.5, a seguir serão apresentadas

as idéias básicas das técnicas de Separação e Avaliação Progressiva ("Branch and Bound") e de Enumeração Implícita respectivamente.

4.4 - Técnica de Separação e Avaliação Progressiva ("Branch and Bound")

A técnica de Separação e Avaliação Progressiva, denominada na literatura de língua inglesa de "Branch and Bound", foi desenvolvida por Land e Doing em 1960 [2, 3, 4] sendo muito utilizada para a solução de problemas de programação linear inteira com variáveis binárias (0 - 1).

A idéia básica desta técnica é a seguinte:

- Suponha que uma função objetivo deva ser minimizada.
- Assuma que um "limite superior" do valor ótimo da função objetivo é disponível (este é o valor da função objetivo do caso base).

Por exemplo, no problema tratado neste trabalho, este limite seria o valor de ZY (3.75) calculado para um determinado ponto de operação do sistema de potência imediatamente antes da realização de uma manobra.

- A primeira etapa consiste em dividir o conjunto de todas as soluções possíveis (no caso do exemplo citado, o conjunto de todas as manobras {N}) em vários subconjuntos, e pa

ra cada um, calcular o valor da função objetivo que provisória-mente é chamado de limite inferior de ZY .

- Aqueles subconjuntos para os quais o valor encontrado da função objetivo ultrapassa o limite superior do caso base são excluídos, por contrariarem o objetivo de minimização. [Note que estes subconjuntos podem ser excluídos por outras considerações, tais como, por exemplo, no caso de uma restrição qualquer não ser obedecida].

O subconjunto com o menor valor da função objetivo ZY assume então agora o lugar do antigo "limite superior" (da última iteração). A partir desse momento o processo é repetido, considerando apenas as novas subdivisões possíveis para o conjunto de variáveis de decisão.

Todos aqueles subconjuntos cujo valor da função objetivo ZY ultrapassar ao novo "limite superior" estão excluídos. O processo é concluído logo que uma única solução possível seja encontrada, a qual corresponde ao menor valor alcançado para a função objetivo ZY , significando que não existe nenhum outro subconjunto para o qual o valor da função objetivo seja menor.

Esta técnica, denominada de Separação e Avaliação Progressiva ("Branch and Bound"), pode ser esquematizada através de um grafo como o da Figura 4.1 apresentada a seguir.

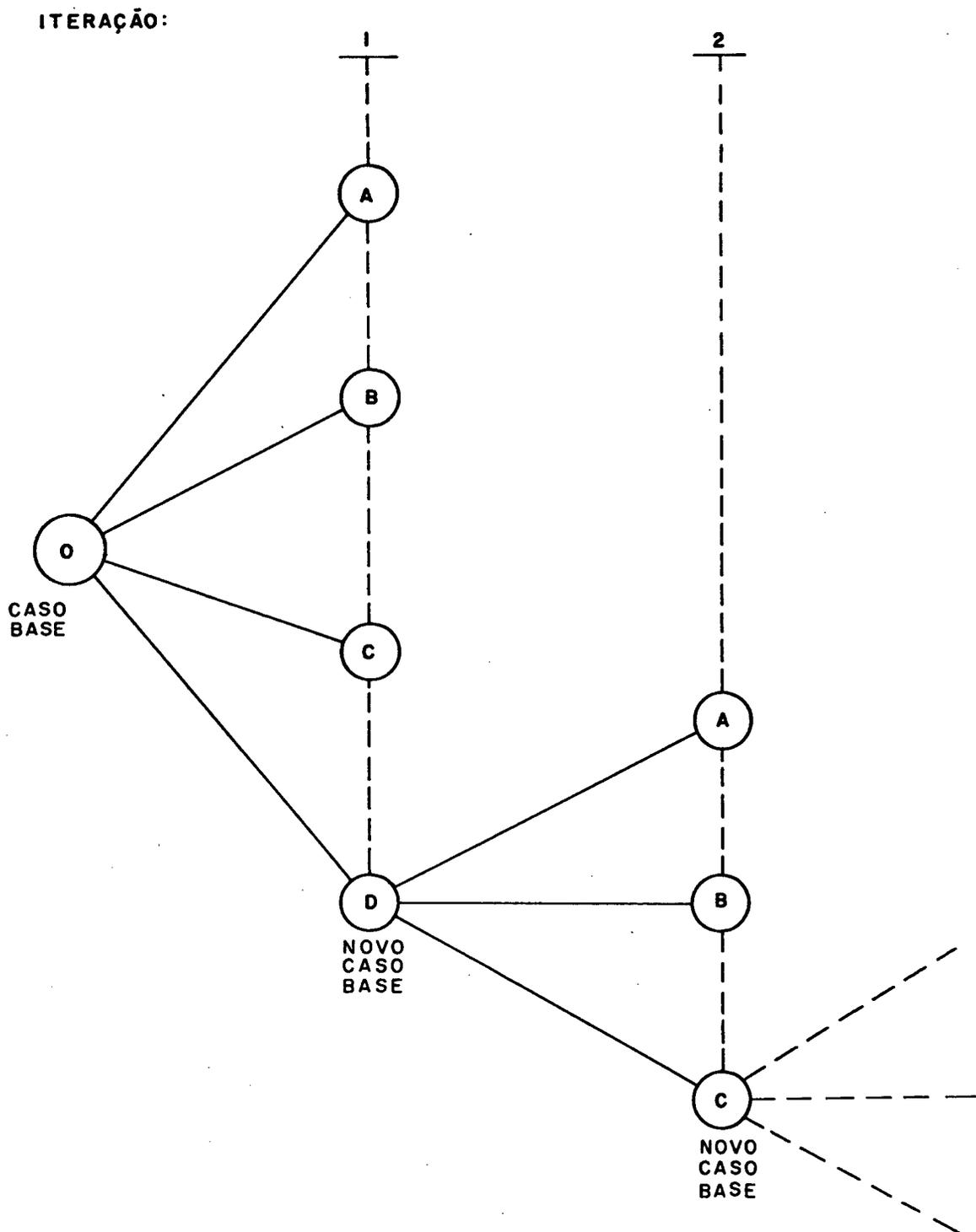


Figura 4.1 - Grafo do Método de Separação e Avaliação Progressiva ("Branch and Bound").

Explicitamente as etapas da técnica de Separação e Avaliação Progressiva [4] são:

1ª Etapa : Início

Inicia-se com o "limite superior" do valor da função objetivo ZY superior (caso base). Este limite superior é a melhor estimativa para o valor da função objetivo do problema original [3].

2ª Etapa : Partição ("Branch")

Usa-se alguma estratégia de partição para dividir o conjunto de soluções em dois ou vários subconjuntos de possíveis soluções para o problema.

As duas estratégias mais populares de partição ("Branch Rules") para selecionar o conjunto a ser particionado são [2, 3, 4, 5]:

- a) O melhor limite ("Best bound") e
- b) O mais novo limite ("Newest bound").

Descreve-se brevemente a seguir cada uma destas estratégias:

a) Estratégia do Melhor Limite ("Best Bound")

Recomenda selecionar o subconjunto com o melhor

valor da função objetivo ZY (no caso de minimização, o de menor limite inferior; ou seja, o menor ZY inferior), procurando encontrar mais rapidamente possível a solução do problema (ver o algoritmo de Land e Doing [3]).

b) Estratégia do Mais Novo Limite ("Newest Bound")

Recomenda selecionar o mais recente subconjunto criado com o melhor valor da função objetivo ZY .

Esta estratégia é mais simples de ser programada [2, 3, 4, 5], sendo a preferida em muitos casos, tendo-se revelado também vantajosa para o caso do problema tratado aqui neste trabalho.

3ª Etapa : Verificação

Para cada novo subconjunto desenvolvido verificar se:

- 1 - $ZY_{inferior} \geq ZY_{superior}$? Se fôr, aplique a regra de parada. Se não fôr, se faz a verificação (2) seguinte.
- 2 - O valor da função objetivo ZY inferior calculada é uma solução possível? Se fôr, se faz a verificação (3) abaixo. Caso contrário, se aplica a regra de parada novamente.
- 3 - Se $ZY_{inferior}$ é uma solução possível, verificar se $ZY_{inferior}$ é menor que $ZY_{superior}$ ($ZY_{inferior} < ZY_{superior}$?). Se não fôr se aplica a regra de parada. Se

fôr, então se faz ZY_{superior} igual a ZY_{inferior} ($ZY_{\text{superior}} = ZY_{\text{inferior}}$) e se compara este valor com o resto dos valores de ZY obtidos para os outros subconjuntos como em (1) se fôr menor, armazene este valor como uma possível solução. Se são fôr se aplica a regra de Parada.

Regra de Parada

A regra de parada está inserida na etapa de verificação, e é a seguinte: O processo é interrompido quando não existem novos subconjuntos que possam ser gerados e, nesse caso, a solução ZY^* de (3) na etapa de verificação é a solução ótima. Caso contrário volte à 2ª etapa (Etapa de Partição).

4.5 - Técnica de "Enumeração Implícita"

Esta técnica geralmente é usada em algoritmos desenvolvidos para a solução de problemas de Programação Linear Inteira com variáveis 0 e 1.

A idéia básica da técnica de "Enumeração Implícita" na solução de um problema de Programação Linear Inteira do tipo zero-um, é o desenvolvimento de uma arborescência (como na técnica de Separação e Avaliação Progressiva) composta de nós e ramos (ver Figura 4.1) garantindo a enumeração explícita ou implícita dos 2^n possíveis valores que possam assumir as variáveis binárias x_j (0 ou 1), $j = 1, \dots, n$ [2, 3], na solução do problema. Através desta técnica só são empregadas operações aritméticas de soma e subtração, evitando-se com isto operações de divisão e multiplicação.

Basicamente, o mais importante resultado da aplicação desta técnica é o fato de que, na solução dos problemas de

Programação Linear Inteira do tipo zero-um, só são necessárias operações aritméticas de soma e subtração em cada iteração [2, 3, 4, 5].

4.6 - Algoritmo de Separação e Avaliação Progressiva usando a Técnica de Enumeração Implícita para a Solução de Problemas de Programação Linear Inteira do Tipo Zero-Um

O algoritmo descrito a seguir foi desenvolvido utilizando a técnica de Separação e Avaliação Progressiva associada às idéias citadas anteriormente, provindas das técnicas de Enumeração Implícita, para solucionar Problemas de Programação Linear Inteira com variáveis 0 e 1.

Neste algoritmo o procedimento é o seguinte:

- 1º) Define-se um subconjunto $\{N\}$ de variáveis $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, (ao valor assinalado as variáveis do conjunto $\{N\}$ se denomina de solução parcial).
- 2º) Na etapa de partição ("Branch Step"), usando a estratégia do mais novo limite ("Newest Bound"), uma solução parcial $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ é selecionada para ser particionada em dois novos subconjuntos (de soluções parciais) com $x_{N+1} = 1$ e $x_{N+1} = 0$.

39) Na etapa de limite ("Bound Step"), o limite inferior, para uma solução parcial $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ é dado por:

a) Se $x_N = 1$:

$$ZY_{\text{inferior}} = \sum_{j=1}^N C_j x_j \quad (4.8),$$

ou

b) Se $x_N = 0$:

$$ZY_{\text{inferior}} = \sum_{j=1}^{N-1} C_j + C_{N+1} \quad (4.9)$$

49) A etapa de verificação, então é aplicada a uma solução parcial como segue:

TESTE 1 - Verificar se $ZY_{\text{inferior}} \geq ZY_{\text{superior}}$.

Se sim, fazer o teste 4. Se não, fazer o teste 2.

TESTE 2 - Verificar se pelo menos uma das restrições é obedecida para a solução parcial completa $\{x_1, x_2, \dots, x_N, x_{N+1}, \dots, x_n\}$.

Para isso se verifica se na solução parcial

$\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$:

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} x_j + \sum_{j=N+1}^N \max\{a_{ij}, 0\} < b_i \quad (4.10),$$

para algum $i = 1, 2, \dots, m$; desde que:

$$\text{m\`ax} \{a_{ij}, 0\} = \text{m\`ax} \{a_{ij} x_j \mid x_j = 0 \text{ ou } 1\}.$$

Se a resposta \u00e9 sim, fazer o teste 4. Se n\u00e3o, fazer o teste 3.

TESTE 3 - Verificar se a solu\u00e7\u00e3o parcial que proporciona o valor do limite inferior, ZY_{inferior} , \u00e9 uma solu\u00e7\u00e3o poss\u00edvel. Para tanto, \u00e9 verificado se na solu\u00e7\u00e3o parcial $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$:

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} x_j + a_{i, N+1} (1 - x_N) \geq b_i \quad (4.11),$$

para todo $i = 1, 2, \dots, m$; e onde $x_{N+1} = 1 - x_N$ e o resto das vari\u00e1veis se fazem iguais a zero.

Se o resultado \u00e9 sim, fazer $ZY_{\text{inferior}} = ZY_{\text{superior}}$ e armazenar esta solu\u00e7\u00e3o como uma poss\u00edvel solu\u00e7\u00e3o \u00f3tima e fazer o teste 4.

Se o resultado \u00e9 n\u00e3o, fazer $N = N+1$ e $x_{N+1} = 1$ e ir para a etapa de parti\u00e7\u00e3o.

TESTE 4 - Testar se na solu\u00e7\u00e3o parcial $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$:

$$x_1 = x_2 = \dots = x_N = 0.$$

Se a resposta \u00e9 sim, o processo \u00e9 concluido e a solu\u00e7\u00e3o encontrada \u00e9 a \u00f3tima.

Se não, fazer:

$$\text{a) } M = \text{m\acute{a}x } \{j \mid x_j = 1\} \text{ para } j \leq 1 \quad (4.12),$$

$$\text{b) } x_M = 0 \quad (4.13),$$

$$\text{c) } N = M \quad (4.14),$$

e voltar a etapa de partiç\~{a}o ("Branch Step"), e assim por diante.

O fluxograma do algoritmo \^e mostrado na Figura 4.2 a seguir.

1a. ETAPA - INÍCIO

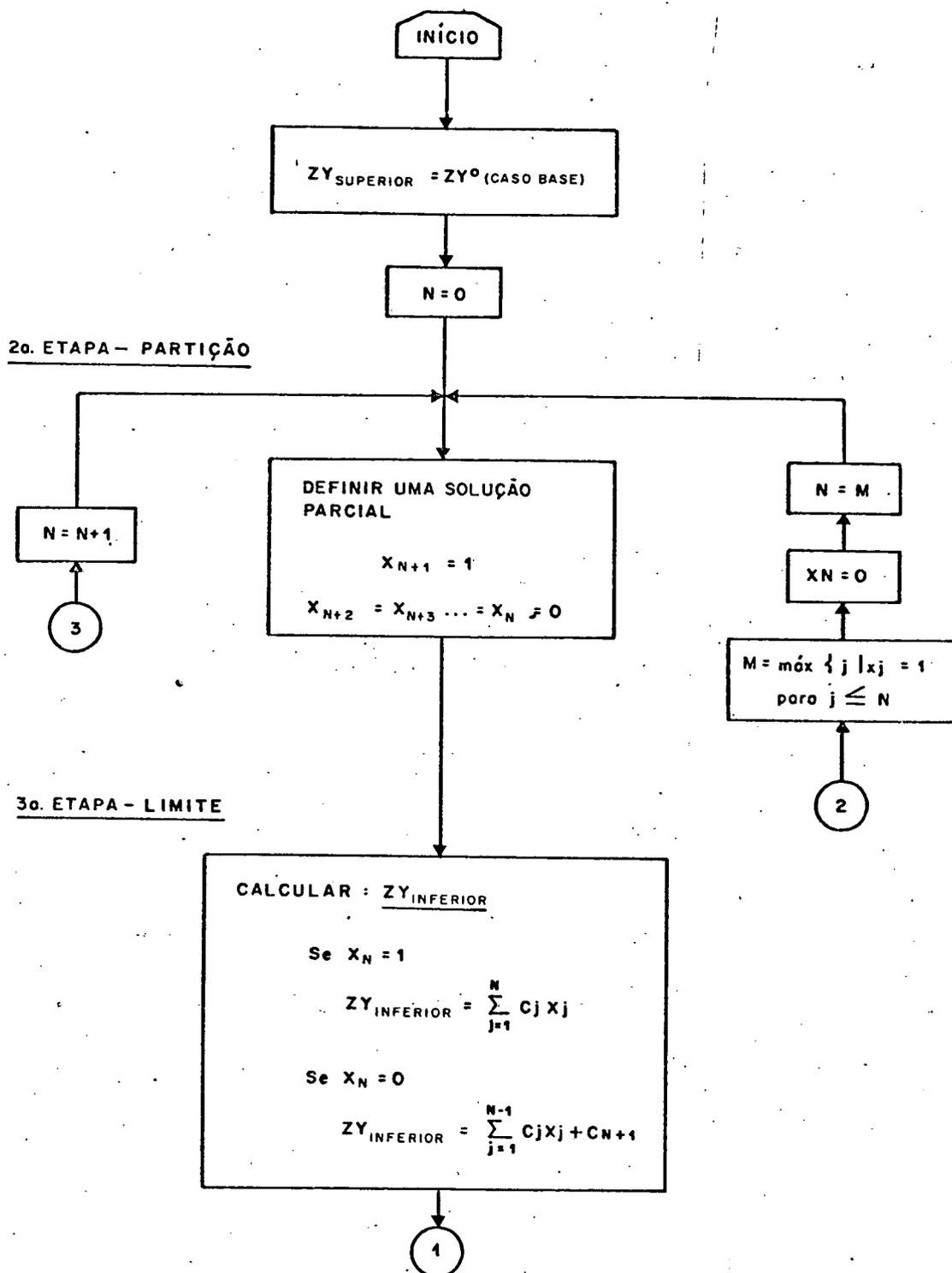


Figura 4.2 - Fluxograma do Algoritmo de Separação e Avaliação Progressiva ("Branch and Bound") usando Técnica de Enumeração Implícita empregado na Solução de Problemas de Programação Linear Inteira do tipo Zero-Um.

4a. ETAPA - VERIFICAÇÃO

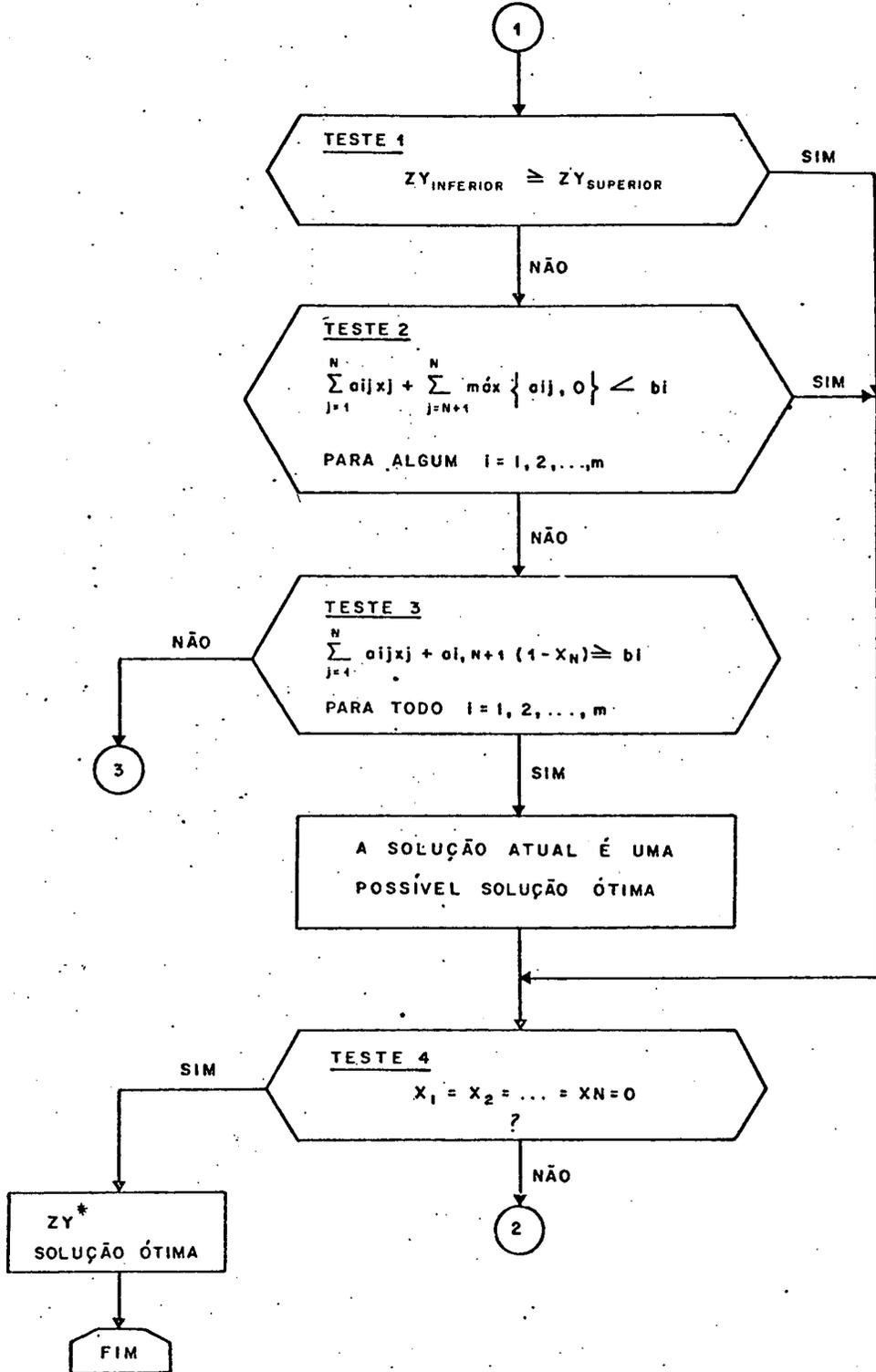


Figura 4.2 - Continuação.

Na referência [11] pode ser encontrado um exemplo de aplicação do algoritmo a um Problema de Programação Linear Inteira com variáveis restritas a assumir valores 0 e 1.

4.7 - Algoritmo de Separação e Avaliação Progressiva aplicado à Solução do Sub-Problema Determinação da Melhor Alternativa de Mudança Topológica da Rede

As idéias básicas apresentadas através do algoritmo do item 4.6, com algumas modificações, foram utilizadas para construir o algoritmo descrito a seguir, visando a solução do Problema de Programação Linear Inteira do tipo zero-um, que resulta do sub-problema para determinação da melhor alternativa de mudança topológica da rede.

O algoritmo compreende os seguintes passos:

- PASSO I - Definir o subproblema usando as expressões (3.75), (3.76) e (3.77). Entrar com o valor de $ZY(0)$ (3.75) da rede sobrecarregada antes de alguma manobra.
- PASSO II - Calcular o vetor das variáveis de decisão (injeções de compensação) I_{cl} (3.27) para os elementos chaveáveis da rede pertencentes ao sub-conjunto $\{L\}$.
- PASSO III - Assinale um valor (1) a uma variável δ_M (variável pertencente ao conjunto $\{M\} = \{L\}$) segundo um certo critério que é descrito abaixo, e calcule $ZY = ZY(M)$ (3.75) que é uma solução parcial do problema.

CRITÉRIO DE ESCOLHA DA VARIÁVEL δ_M :

O critério utilizado para a escolha da variável δ_M consiste em escolher a variável binária assinalada no elemento do subconjunto $\{L\}$, cujo valor calculado da injeção de compensação (I_{cl}) é o menor.

PASSO IV - Verifique se o valor de $ZY(M)$ é menor ou igual a $\epsilon_{ZY} = 10^{-5}$, se é menor ou igual a $\epsilon_{ZY} = 10^{-5}$ o processo é concluído e a solução encontrada é a ótima. Caso contrário passe ao passo seguinte.

PASSO V - Verifique se $ZY(M)$ é menor que $ZY(0)$ (valor de ZY para o ponto de operação estudado). Se é menor, faça $ZY(0) = ZY(M)$. Caso contrário $ZY(0)$ não é alterado, passe ao passo seguinte.

PASSO VI - Verifique se M é diferente de L . Sendo, fazer $\delta_M = 0$ e $M = M + 1$ indo para o caso III. Se não continue no passo seguinte.

PASSO VII - Verifique se o melhor valor (ótimo) calculado das soluções parciais $ZY(M)$ é menor que $ZY(0)$ (valor de ZY para o ponto de operação estudado). Se sim, então o valor de $ZY(M)$ é a solução ótima e o processo é concluído.

Se não, a solução do problema é impossível e o processo é concluído significando que nenhuma manobra é capaz de diminuir o nível de sobrecarga apresentado no ponto de operação estudado ($ZY(0)$).

O Fluxograma do algoritmo é mostrado na Figura 4.3.

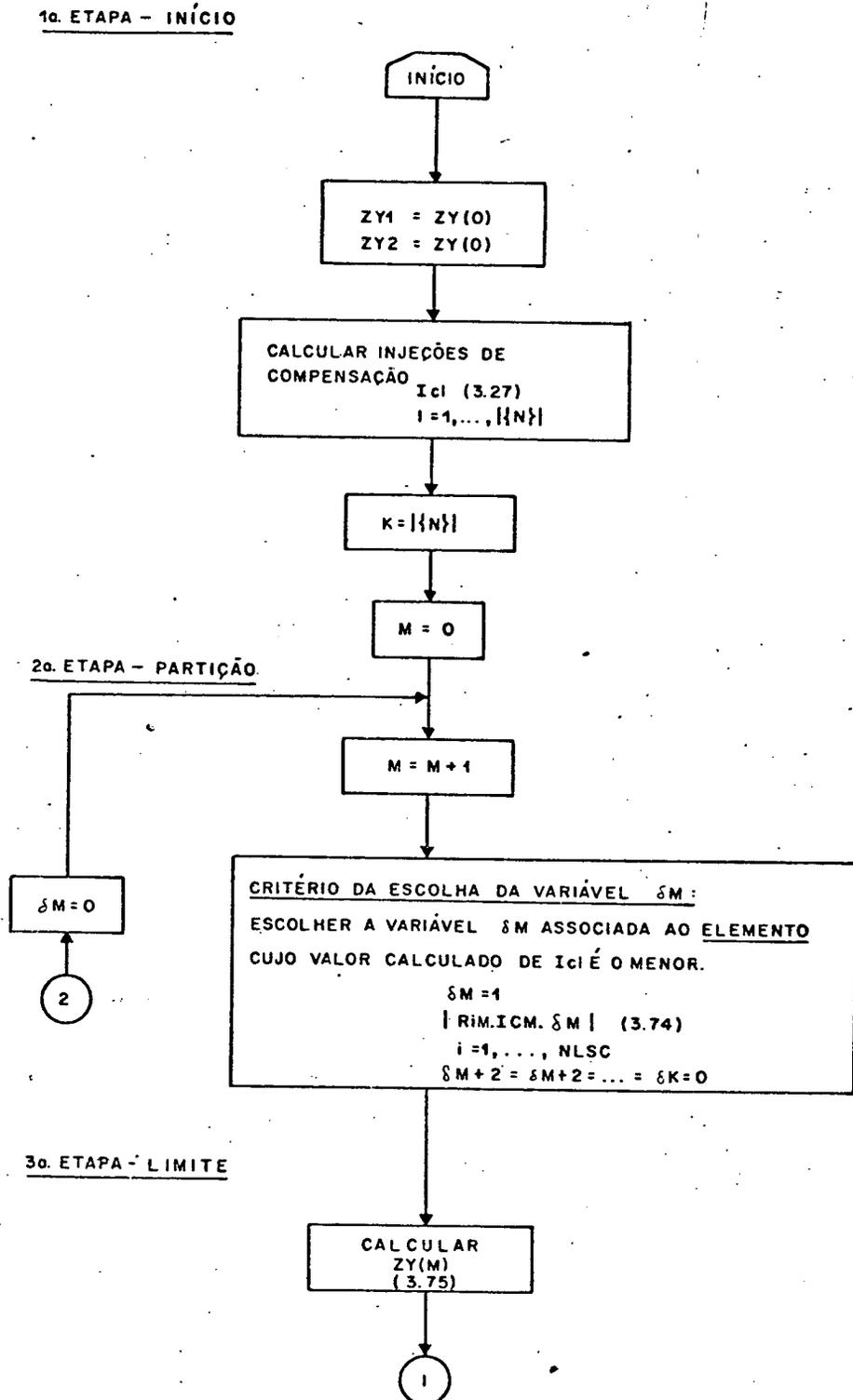


Figura 4.3 - Fluxograma do Algoritmo de Separação e Avaliação Progressiva aplicado ao Sub-Problema. Determinação da Melhor Alternativa de Mudança Topológica da Rede.

4a. ETAPA - VERIFICAÇÃO

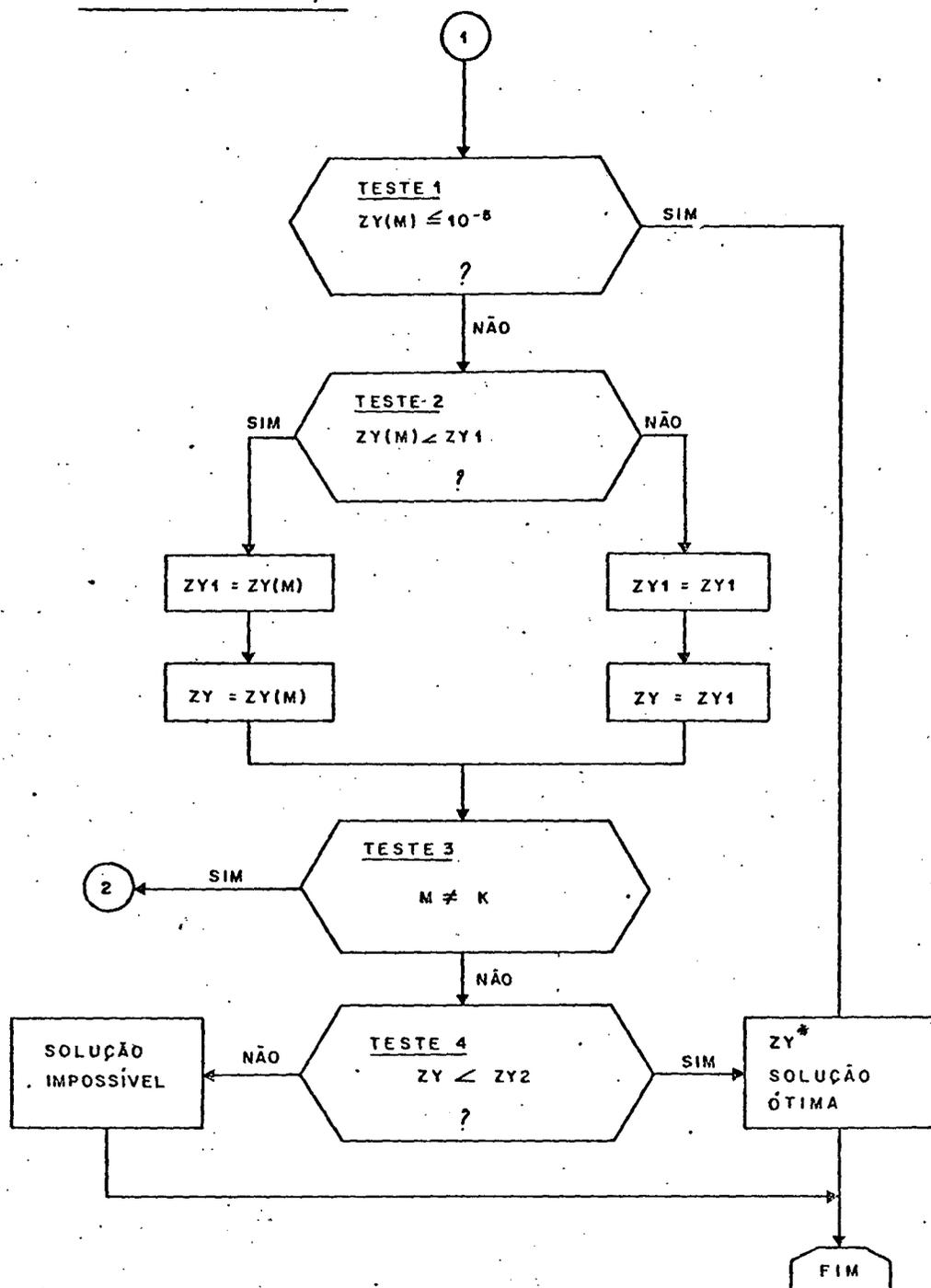


Figura 4.3 - Continuação.

Neste algoritmo a estratégia de partição usada foi a estratégia do mais novo limite ("Newest Bound"); ou seja, o mais recente subconjunto criado é o que vai ser particionado.

A diferença entre o algoritmo apresentado no item 4.4.1 e o algoritmo aqui apresentado, está na etapa de verificação. Isto se deve à forma como foi formulado o problema. Na formulação aqui proposta se $ZY(M)$ (3.75) for uma solução parcial possível a restrição (3.76) é satisfeita automaticamente. Ou seja, se a solução parcial que resultou do Passo III é uma solução possível, não é necessário verificar se a restrição (3.76) é satisfeita.

4.8 - Conclusões

Neste Capítulo foi visto como um problema de Programação Linear, no momento em que algumas variáveis são restritas a assumir valores inteiros, se transforma num problema de Programação Linear Inteira. Também foi visto como estes problemas de PLI podem ser transformados em problemas de programação linear inteira com variáveis restritas a assumir valores 0 e 1 e, neste caso passam a ser denominados de problemas de Programação Linear Inteira do tipo zero-um.

Idéias básicas da técnica de Separação e Avaliação Progressiva ("Branch and Bound"), e da técnica da Enumeração Implícita (técnicas estas, empregadas em algoritmos para solução de problema de Programação Linear Inteira do tipo zero-um) são descritas.

Um algoritmo utilizando as técnicas acima mencionadas, empregado na solução de problema de Programação Linear Inteira do tipo zero-um é apresentado. Este algoritmo apresenta duas modificações que reduzem o esforço computacional por iteração que são:

- 1º) Utilização da técnica de enumeração implícita para reduzir os cálculos a simples operações aritméticas de adição e subtração.
- 2º) Aplicação da estratégia do mais novo limite ("Newest Bound") que é também, de mais fácil programação para selecionar o subconjunto a ser particionado.

Finalmente mostrou-se como as idéias acima, com algumas modificações, foram utilizadas para construir o algoritmo para solucionar o subproblema de determinação da melhor alternativa de mudança topológica da rede, procurando com isto, dentro do pretendido neste trabalho, explorar ao máximo a estrutura do problema, visando obter soluções rápidas e confiáveis, de maneira a poder determinar as melhores estratégias de operação em tempo real, dentro da filosofia estabelecida, além de diminuir os requisitos de memória computacional.

C A P Í T U L O . 5

DESCRIÇÃO DO PROGRAMA DESENVOLVIDO PARA A SOLUÇÃO
DO PROBLEMA ATRAVÉS DE COMPUTADOR5.1 - Introdução

Neste Capítulo é apresentado o programa desenvolvido para resolver o problema de Mudanças na Topologia da Rede visando o alívio de sobrecargas no seu primeiro nível de composição - Determinação da melhor alternativa de mudança topológica da rede.

Consiste basicamente na adaptação de uma versão do algoritmo de Separação e Avaliação Progressiva ("Branch and Bound") para tratar do problema formulado no Capítulo 4.

Na forma atual, se encontra subdividido em dois sub-programas que são:

Sub-Programa 1 - Retirada de Circuitos (alterações Simples);

Sub-Programa 2 - Adição de Circuitos (alterações Simples e Múltiplas);

apresentados com seus fluxogramas nos itens 5.3 e 5.4 respectivamente.

Este programa foi implantado num microcomputador I - 7000 PCxt do LABSPOT (Laboratório de Sistemas de Potência) do Centro Tecnológico da UFSC e também no computador IBM 4341 do

Núcleo de Processamento de Dados da UFSC numa versão previamente adaptada.

A preparação dos dados necessários para a utilização do sub-programa 1 e sub-programa 2 é descrito no item 5.2.

A descrição de cada um dos subprogramas é apresentado nos itens 5.3.2 e 5.4.2 consistindo da definição das variáveis, matrizes, vetores e demais elementos que permitem interpretá-los, visando torná-los um código aberto e facilmente compreensível, de modo a tornar o mais simples possível qualquer modificação no sentido de aperfeiçoá-los.

No item 5.5, é apresentado o fluxograma completo da versão atual do Programa para resolver o Problema de Mudanças na Topologia da Rede visando o alívio de sobrecargas na Análise de Segurança em Tempo Real.

Finalmente são apresentadas, no item 5.6, as principais conclusões deste Capítulo.

5.2 - Entrada de Dados

Existe um sub-conjunto de dados, necessários para a utilização dos subprogramas 1 e 2, que é comum aos dois. Estes dados são o estado (θ , V) da rede elétrica para uma dada situação operacional (ponto de operação), determinada nas seguintes situações:

- a) Após a detecção de sobrecargas reais via monitoração da segurança em tempo real;
- b) A saída da análise de contingências quando es

tão associados a sobrecargas potenciais (na
 operação em tempo real, no planejamento da
 transmissão) e

- c) Associadas a soluções impossíveis do DGTR (na
 análise de segurança em tempo real).

Neste trabalho, segundo a filosofia adotada, se
 está interessado na situação (c). O ponto de operação, que pas
 sa a ser chamado de "caso base estudado", proporciona as seguin
tes informações para a utilização dos sub-programas 1 e 2.

- a) Injeções de potência ativa de geração e carga
 (\underline{P}^0) para o caso base estudado;
- b) Topologia da rede elétrica (B^0) para o caso ba
 se estudado;
- c) Estados da rede elétrica (\underline{V}^0 , $\underline{\theta}^0$) no caso ba
 se estudado;
- d) $\{L_{SC}\}$ - conjunto de elementos sobrecarregados
 para o caso base estudado e
- e) Valor da função objetivo (3.75) que mede o ní
 vel de sobrecarga (ZY^0) para o ponto de opera
 ção do caso base estudado.

Outra parte dos dados necessários comuns para am
 bos os subprogramas são:

1º) Conjunto {L} de elementos chaveáveis.

2º) As características técnicas e os parâmetros elétricos dos diferentes equipamentos de transporte (limites térmicos de linhas e transformadores, resistência série, reatância série, etc). Estas características podem ser obtidas, diretamente dos dados de fabricantes ou obtidos através de técnicas de identificação.

Neste trabalho supõem-se todos estes dados disponíveis.

5.3 - Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples - Subprograma 1

5.3.1 - Algoritmo e Fluxograma do Subprograma de Retirada de Circuitos - Alterações Simples

A seguir é apresentado o Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples, mostrando o fluxograma do programa desenvolvido na Figura 5.1.

Se existe alguma sobrecarga real e/ou sobrecarga potencial para a qual a solução do DS se apresentar impossível (caso base estudado - situação crítica detetada), o Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples - Subprograma 1 deverá realizar os seguintes passos:

PASSO I - Preparar os dados necessários para a utilização do algoritmo no caso base estudado (situação crítica detetada):

- Dados sobre as barras da rede elétrica em estudo:
Número de barras; injeções de potência ativa gerada ($\underline{P_G^0}$); injeções de potência ativa consumida ($\underline{P_C^0}$); estados ($\underline{\theta^0}$).
- Dados sobre os elementos (circuitos) da rede elétrica em estudo (topologia):
Número de elementos (NL), reatância série; capacidade; elementos em contingência (NC); elementos chaveáveis (NLCH).
- Valor de ZY^0 (3.75) da rede sobrecarregada antes de alguma manobra.

PASSO II - Calcular as Injeções de Compensação (conjunto $\{L\}$ de elementos chaveáveis). Aplicando a Teorema da Compensação.

PASSO III - Aplicar o algoritmo de Separação e Avaliação Progressiva (item 4.7) para a escolha da melhor manobra m_i^* .

Seja m_i^* a melhor manobra numa iteração corrente e seja ZY^* (3.75) o valor associado da função objetivo, então testar:

- $ZY^* \leq \epsilon_{ZY} = 10^{-5}$? Sim. Então não há sobrecargas o processo é concluído e a saída proporciona a manobra m_i^* e os trânsitos correspondentes. Fim. É bom ressaltar que isto significa parar se for encontrada uma m_i^* que alivia totalmente as so

brecargas. Note-se que isto não garante que não existam outras manobras de mais fácil execução e menor risco entre as demais manobras que foram examinadas.

Não, então persistem sobrecargas.

- Se $ZY^* < ZY$, então a manobra m_i^* corrente alivia mais as sobrecargas e é a nova melhor manobra.
Passar à próxima manobra.
- Se $ZY^* \geq ZY$, então a nova manobra m_i^* não é melhor do que m_i^* e é rejeitada, passando-se a examinar outra da lista.

Caso persistam sobrecargas, depois de ter se realizado todas as manobras disponíveis m_i , o va-lor de ZY^* (associado à melhor manobra m_i^* esco-lhida) testa-se com $ZY(0)$ do caso base estudado (antes de qualquer manobra). Se for menor, o pro-cesso é concluído e a saída proporciona a manobra m_i^* , os trânsitos e os elementos sobrecarregados. Se for maior, o processo é concluído e a saída proporciona solução Impossível.

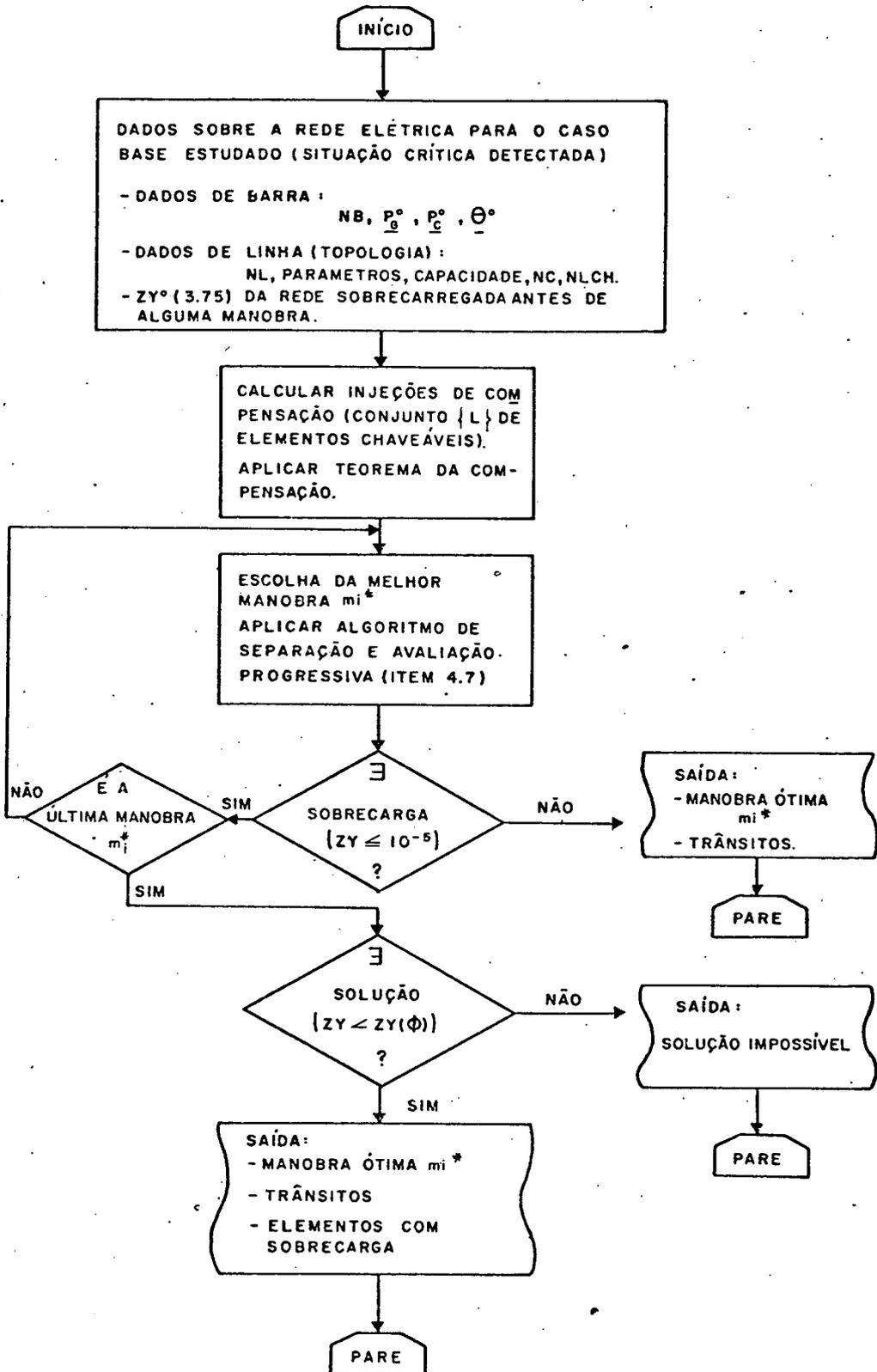


Figura 5.1 - Fluxograma do Subprograma de Retirada de Circuitos - Alterações Simples.

5.3.2 - Descrição do Subprograma de Retirada de Circuitos - Alterações Simples

Para uma melhor descrição do Subprograma de Retirada de Circuitos - Alterações Simples o mesmo será dividido em módulos. Em cada um dos módulos se faz uma descrição sumária de seus argumentos, variáveis, matrizes, vetores e demais elementos de maior interesse.

MÓDULO 1

Finalidade: Organizar os dados necessários para a utilização do programa.

Descrição dos principais elementos:

- NB - Número de barras da rede.
- NL - Número de elementos (circuitos) da rede.
- NL₁ - Número de elementos (circuitos) chaveáveis
- NC - Número de elementos (circuitos) em contingência.
- S_{base} - Potência base do sistema.
- WW - Valor da função objetivo ZY (0) (nível de sobrecarga para o ponto de operação dado) do caso base estudado.
- ILC - Vetor de dimensão NC, contendo os índices das linhas em contingência.

MÓDULO 2

Finalidade: Formação de vetores, matrizes e matrizes de incidência necessários na implementação do programa.

Descrição dos principais elementos:

- Beta - Vetor de dimensão NL contendo o ângulo de fase das tensões das linhas.
- Gama - Vetor de dimensão NL contendo o valor das susceptâncias primitivas das linhas.
- XEQ - Vetor de dimensão NL contendo o valor das reatâncias equivalentes das linhas.
- B_1 - Matriz tipo admitância nodal de dimensão $((NB - 1) \times (NB - 1))$.
- MIB - Matriz de incidência ramo-barra de dimensão $(NL \times (NB - 1))$.
- TNIB - Matriz de incidência injeção de compensação-barra de dimensão $(NL_1 \times (NB - 1))$.
- S - Matriz de dimensão $(NL \times (NB - 1))$, contendo os elementos que relacionam as injeções de potência ativa com os fluxos nas linhas.
- S_2 - Matriz de dimensão $(NL \times NL_1)$, contendo os elementos que relacionam as injeções de compensação de potência ativa com os fluxos nas linhas.

MÓDULO 3

Finalidade: Formação do vetor das injeções de compensação.

Descrição dos Principais elementos:

- ICC - Vetor de dimensão NL_1 , contendo os índices das linhas chaveáveis.
- TTP - Vetor de dimensão NL_1 , contendo os valores das injeções de compensação.
- TT - Vetor idem a TTP.

MÓDULO 4

Finalidade: Escolha da melhor manobra simples m_1^* .

Descrição dos Principais elementos:

- K_{12} - Parâmetro que indica o elemento chaveado, do conjunto $\{L\}$ de elementos chaveáveis.
- TTI - Vetor de dimensão NL_1 , contendo em uma posição o valor da injeção de compensação do elemento chaveado e zero nas demais posições.
- T_1 - Vetor de dimensão NL , contendo o valor dos trânsitos dos elementos da rede elétrica (no ponto de operação dado) do caso base estudado (T^0).
- P_2 - Vetor de dimensão NL , contendo o valor da variação dos trânsitos (ΔT) nos elementos da rede elétrica logo após alguma manobra.

- ZY - Vetor de dimensão NL_1 , contendo o valor calculado da função objetivo (ver 3.75) para cada manobra realizada.
- ZY₁ - Vetor de dimensão NL_1 , que armazena o valor da função objetivo (ver 3.75) para cada manobra m_i realizada (Separação de Avaliação Progressiva).
- T - Vetor de dimensão NL , contendo o valor dos trânsitos nos elementos da rede elétrica logo após se ter realizado uma manobra m_i .

Procedimento: Neste módulo é utilizado o algoritmo empregando a técnica de Separação e Avaliação Progressiva (ver item 4.7) para escolha da melhor manobra simples m_i^* .

5.4 - Algoritmo de Adição de Circuitos - Alterações Simples e Múltiplas - Subprograma 2

5.4.1 - Algoritmo e Fluxograma do Subprograma de Adição de Circuitos - Alterações Simples e Múltiplas

A seguir é apresentado o Algoritmo de Adição de Circuitos - Alterações Simples e Múltiplas, mostrando o fluxograma do programa desenvolvido no Figura 5.2.

Se existe alguma sobrecarga real e/ou sobrecarga potencial para a qual a solução do DS se apresentar impossível (caso base estudado - situação crítica detetada), o Algoritmo de Adição de Circuitos - Alterações Simples e Múltiplas - Subprograma 2 deverá realizar os seguintes passos:

- PASSO I - Preparar os dados necessários para a utilização do algoritmo no caso base estudado (situação crítica detetada):
- Dados sobre as barras da rede elétrica em estudo:
 - Número de barras; injeções de potência ativa gerada (P_G^0); injeções de potência ativa consumida (P_C^0); estados (θ^0).
 - Dados sobre os elementos (circuitos) da rede elétrica em estudo (Topologia):
 - Número de elementos (NL); reatância série; capacidade; elementos em contingência (NC); elementos chaveáveis (NLCH).
 - Valor de ZY^0 (3.75) da rede sobrecarregada antes de alguma manobra.
- PASSO II - Calcular Injeções de Compensação (conjunto {L} de elementos chaveáveis). Alterações Simples. Aplicar Teorema da Compensação.
- PASSO III - Aplicar o algoritmo de Separação e Avaliação Progressiva (item 3.7) para a escolha da melhor manobra m_i^* .
- Seja m_i^* a melhor manobra numa iteração corrente e seja ZY^* (3.75) o valor associado da função objetivo, então testar:
- $ZY^* \leq \epsilon_{ZY} = 10^{-5}$? Sim. Então não há sobrecargas o processo é concluído e a saída proporciona a ma

manobra m_i^* e os trãnsitos correspondentes. Fim.
 É bom ressaltar que isto significa parar se for encontrada uma m_i^* que alivia totalmente as sobrecargas. Note-se que isto não garante que não existam outras manobras de mais fácil execução e menor risco entre as demais manobras que foram examinadas.

Não, então persistem sobrecargas.

- Se $ZY^* < ZY$, então a manobra m_i^* corrente alivia mais as sobrecargas e é a nova melhor manobra. Passa à próxima manobra.
- Se $ZY^* \geq ZY$, então a nova manobra m_i^* não é melhor do que m_i^* e é rejeitada passando-se a examinar outra da lista.

Caso persistam sobrecargas, depois de ter-se realizado todas as manobras disponíveis m_i , o valor de ZY^* (associado à melhor manobra m_i^* escolhida) testa-se com $ZY(0)$ do caso base estudado (antes de qualquer manobra). Se for menor, o processo proporciona a manobra m_i^* , os trãnsitos e os elementos sobrecarregados e se vá ao passo seguinte. Se for maior, o processo é concluído e a saída proporciona solução Impossível.

PASSO IV - Calcular Injeções de Compensação (elementos chaveáveis do conjunto $\{L\}$ que formam a manobra múltipla $\{m\}$). Alterações Múltiplas. Aplicar Teorema da Compensação.

- PASSO V - Aplicar manobra múltipla {m}.
- PASSO VI - Calcular ZY ({m}). Verificar se:
- $ZY \leq 10^{-5}$, então não há sobrecargas, o processo é concluído e a saída proporciona {m}* e os trãnsitos. Se não, isto é, se $ZY > 10^{-5}$, se vá ao passo seguinte.
- PASSO VII - Testa-se a existência de outra manobra múltipla {m} que se possa realizar. Caso exista vá para o passo IV. Se não existem outras manobras múltiplas {m} o processo é concluído e a saída indica quais são os melhores chaveamentos {m}* os trãnsitos e os elementos sobrecarregados.

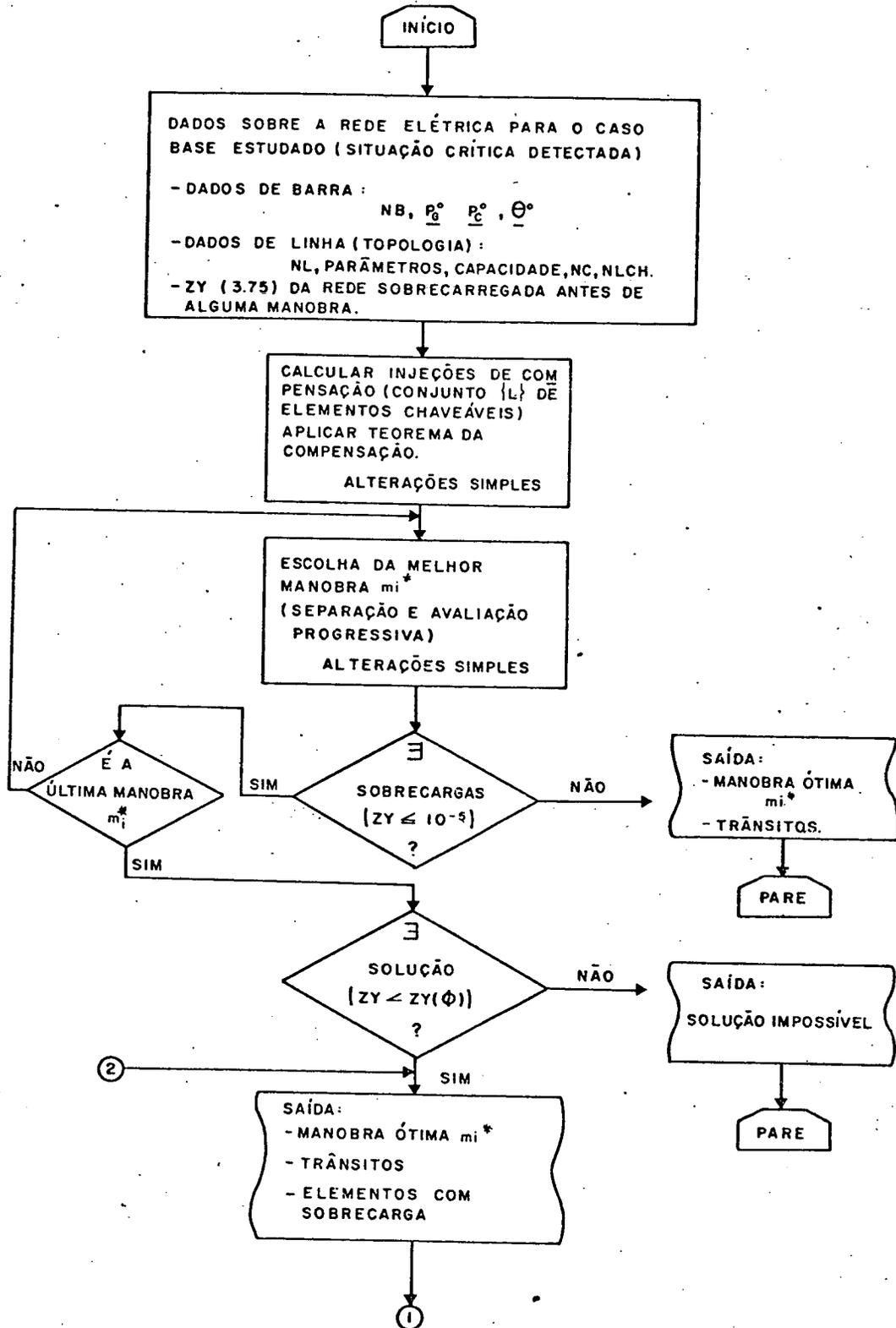


Figura 5.2 - Fluxograma do Subprograma de Adição de Circuitos - Alterações Simples e Múltiplas.

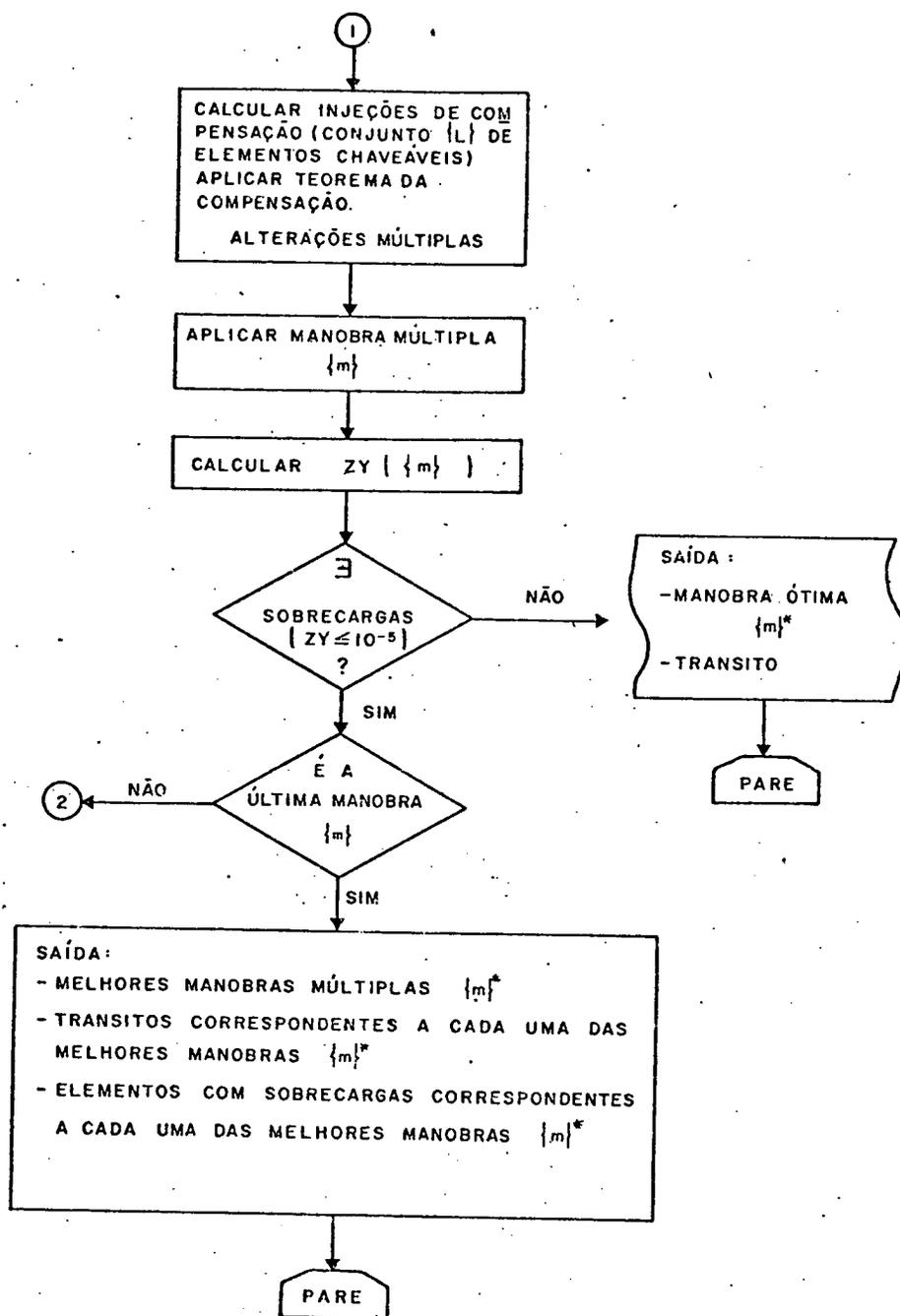


Figura 5.2 - Continuação.

5.4.2 - Descrição do Subprograma de Adição de Circuitos - Alterações Simples e Múltiplas

Da mesma forma que para a descrição do Subprograma de Retirada de Circuitos, o Subprograma de Adição também será dividido em módulos para sua melhor compreensão. Em cada módulo é feita uma descrição sumária de seus argumentos, variáveis, matrizes, vetores e demais elementos de maior interesse.

MÓDULO 1

Finalidade: Organizar os dados necessários para a utilização do programa.

Descrição dos Principais elementos:

- NB - Número de barras da rede.
- NL - Número de elementos (circuitos) da rede.
- NL₁ - Número de elementos (circuitos) chaveáveis
- NC - Número de elementos (circuitos) em contingência.
- NS - Número de manobras múltiplas.
- WW - Valor da função objetivo ZY (0) (nível de sobrecarga para o ponto de operação dado) do caso base estudado.
- S_{Base} - Potência base do sistema.
- ILC - Vetor de dimensão NC, contendo o índice das linhas em contingência.

MÓDULO 2

Finalidade: Formação de vetores, matrizes, matrizes de incidência; necessárias na implementação do programa.

Descrição dos Principais Elementos:

- Beta - Vetor de dimensão NL , contendo o ângulo de fase das tensões de linha.
- Gama - Vetor de dimensão NL , contendo o valor das susceptâncias primitivas das linhas.
- Dama - Vetor de dimensão NL_1 , contendo o valor de Gama dos elementos chaveáveis.
- XEQ - Vetor de dimensão NL , contendo o valor das reatâncias equivalentes dos elementos da rede elétrica.
- ICC - Vetor de dimensão NL_1 , contendo os índices dos elementos chaveáveis.
- MIB - Matriz de incidência ramo - barra de dimensão $(NL \times (NB - 1))$.
- TNIM - Matriz de incidência injeção de compensação barra de dimensão $(NL_1 \times (NB - 1))$.
- B_1 - Matriz tipo admitância nodal de dimensão $((NB - 1) \times (NB - 1))$.
- S - Matriz de dimensão $(NL \times (NB - 1))$, contendo os elementos que relacionam as injeções de potência ativa com os fluxos nas linhas.
- S_2 - Matriz de dimensão $(NL \times NL_1)$, contendo os elementos

que relacionam as injeções de compensação de potência ativa com os fluxos nas linhas.

MÓDULO 3

Finalidade: Formação do vetor das injeções de compensação. Alterações Simples.

Descrição dos principais elementos:

- PPT - Vetor de dimensão NL_1 , contendo os valores das injeções de compensação.
- PP - Vetor idem a PPT.

MÓDULO 4

Finalidade: Escolha da melhor manobra simples m_i^* .

Descrição dos principais elementos:

- K_{12} - Parâmetro que indica o elemento chaveado, do conjunto $\{L\}$ de elementos chaveáveis.
- PPI - Vetor de dimensão NL_1 , contendo numa das posições o valor da injeção de compensação do elemento chaveado e zero nas demais posições.
- T_1 - Vetor de dimensão NL , contendo o valor dos trânsitos dos elementos da rede elétrica (no ponto de operação dado) do caso base estudado (T^0).
- P_2 - Vetor de dimensão NL , contendo o valor das variações

dos trãnsitos (ΔT) nos elementos da rede elétrica logo após a realização da manobra m_i .

- ZY - Vetor de dimensão NL_1 , contendo o valor calculado da função objetivo (ver 3.75) para cada manobra realizada.
- ZY₁ - Vetor de dimensão NL_1 , que armazena o valor da função objetivo (ver 3.75) para cada manobra m_i realizada (Separação e Avaliação Progressiva).

Procedimento: Neste módulo é aplicado o algoritmo empregando a técnica de Separação e Avaliação Progressiva (ver item 4.7, Capítulo 4) para escolha da melhor manobra simples m_i^* .

MÓDULO 5

Finalidade: Realizar manobras múltiplas {m}.

Descrição dos principais elementos:

- ND - Número de estados; ou seja número de manobras múltiplas a realizar. $ND = 2^{NL_1} - NL_1 - 1$.
- ICE - Vetor de dimensão NS, contendo o índice da manobra múltipla {m} a realizar.
- ILE - Vetor de dimensão NS, contendo o índice que indica o número de manobras múltiplas {m} a realizar.
- IPE - Vetor de dimensão NS, contendo os índices dos elementos chaveáveis para cada combinação que formam a manobra múltipla {m} a realizar.

NO - Parâmetro que indica o elemento que foi escolhido como a melhor manobra m_i^* simples no passo anterior ao processo de análise de manobras múltiplas.

NO = 2 - Elemento associado a melhor manobra m_i^* simples.

NO = 0 - Elemento que não é a melhor manobra m_i simples.

NOTA: Este parâmetro é importante porque limita a busca de $\{m\}$ a aqueles subconjuntos de manobras que contém m_i^* .

MÓDULO 6

Finalidade: Formação do vetor das injeções de compensação. Al terações Múltiplas.

Descrição dos principais elementos

ID - Vetor de dimensão igual ao número de elementos que formam a manobra múltipla $\{m\}$ a ser realizada, con tendo os índices dos elementos a serem chaveados.

ICO - Vetor de dimensão igual ao número de elementos que formam a manobra múltipla $\{m\}$ a ser realizada, con tendo o índice de um valor inteiro que varia de 1 a NS.

PP₁ - Vetor de dimensão igual ao número de elementos que formam a manobra múltipla $\{m\}$ a ser realizada, con tendo o valor das injeções de compensação.

- W_2 - Matriz (quadrada) das alterações, de dimensão igual ao número de linhas que formam a manobra múltipla {m} a ser realizada.
- DAMA - Vetor de dimensão igual ao número de elementos que foram a manobra múltipla {m} a ser realizada, contendo o valor de Gama dos elementos que formam a manobra múltipla {m}.

MÓDULO 7

Finalidade: Calcular o valor da função objetivo ZY (ver 3.75) e os trânsitos logo após se ter realizado a manobra múltipla {m}.

Descrição dos principais elementos

- T_1 - Vetor de dimensão NL, contendo o valor dos trânsitos dos elementos da rede elétrica (no ponto de operação dado) do caso base estudado (T^0).
- P_2 - Vetor de dimensão NL, contendo o valor das variações dos trânsitos (ΔT) nos elementos da rede elêtrica logo após a realização da manobra múltipla {m}.
- T - Vetor de dimensão NL, contendo o valor dos trânsitos nos elementos da rede elétrica logo após se ter realizado a manobra múltipla {m}.
- ZY - Vetor de dimensão igual a ND, contendo o valor da função objetivo (ver 3.75) para cada manobra múltipla {m} realizada.

5.5 - Fluxograma Completo da Versão Atual do Programa para Solução do Problema de Mudanças na Topologia da Rede visando o Alívio de Sobrecargas dentro da Análise de Segurança em Tempo Real

A seguir, na Figura 5.3 é mostrado o fluxograma do programa, na versão atual, para resolver o Problema de Mudanças na Topologia da Rede visando o Alívio de Sobrecargas na Análise de Segurança em Tempo Real.

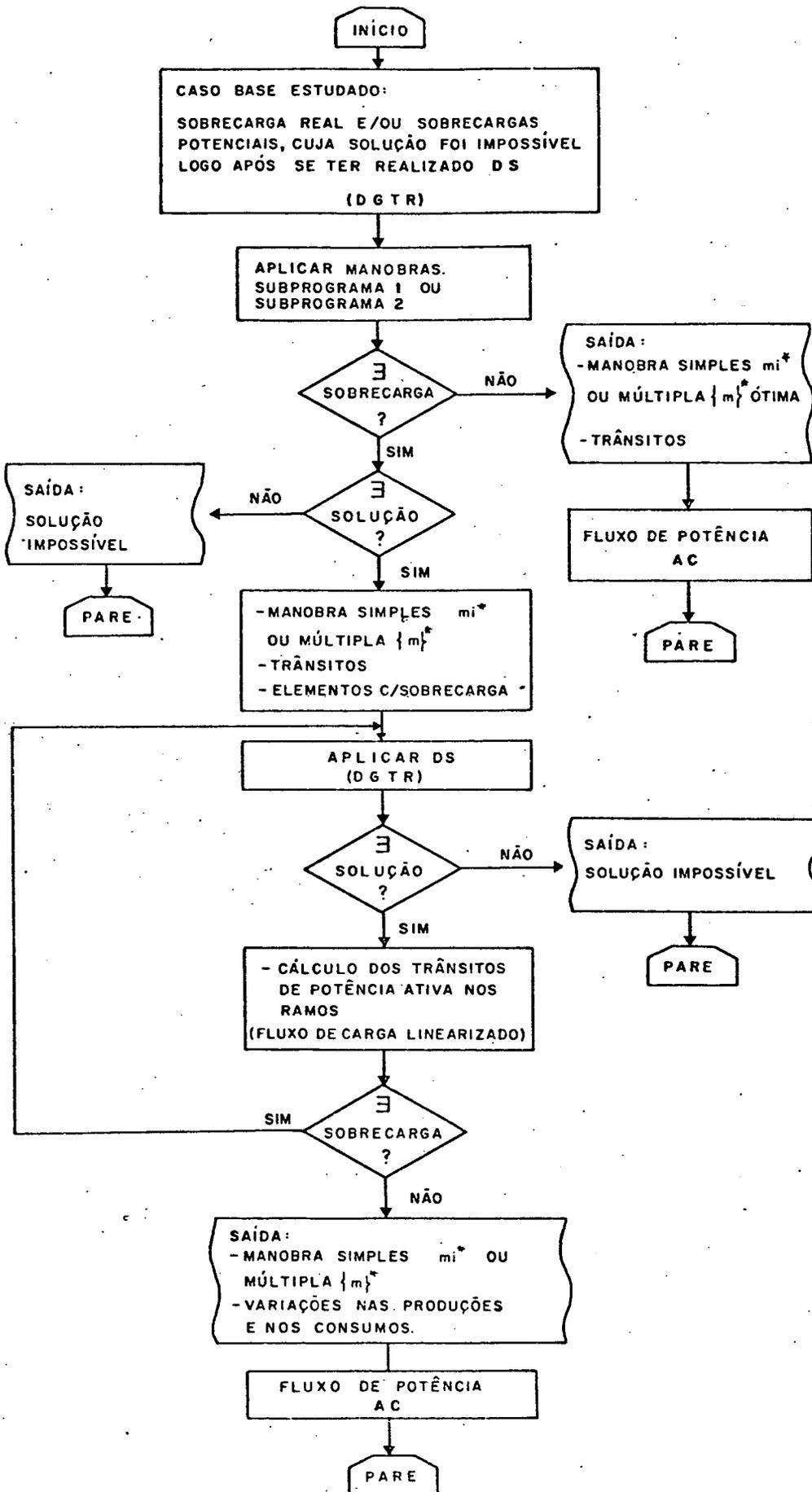


Figura 5.3 - Fluxograma na Versão Atual.

5.6 - Conclusões

Neste Capítulo foi apresentada a entrada de dados para a utilização dos Algoritmos desenvolvidos para resolver o Problema de Mudanças na Topologia da Rede visando o Alívio de Sobrecargas, no seu primeiro nível de decomposição (item 3.3.1 Capítulo 3).

Apresentaram-se também os algoritmos de retirada (Alterações Simples) e Adição (Alterações Simples e Múltiplas) de circuitos, bem como seus respectivos fluxogramas.

Foi feita uma descrição dos algoritmos de retirada e adição os quais foram subdivididos em módulos. Em cada módulo definiram-se os vetores, matrizes e variáveis de maior interesse, procurando-se constituir um manual de utilização simplificado.

Finalmente apresentou-se o fluxograma completo da versão atual do Programa para solução do Problema de Mudanças na Topologia da Rede visando o alívio de sobrecarga dentro da Análise de Segurança em Tempo Real.

C A P Í T U L O 6

RESULTADOS DA UTILIZAÇÃO DO ALGORITMO DE RETIRADA DE CIRCUITOS - ALTERAÇÕES SIMPLES - SUBPROGRAMA 1

6.1 - Introdução

Neste Capítulo são apresentados e analisados os resultados da utilização do Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples, em três sistemas elétricos, que serão doravante chamados de:

- Sistema AEP - 14,
- Sistema Sul,
- Sistema IEEE - 118 Barras

Os dados sobre estas três rede elétricas incluem o conjunto de elementos chaveáveis, bem como, seus respectivos diagramas unifilares são objeto dos itens 6.2, 6.5 e 6.8.

Os sistema AEP - 14, obtido da referência [15] se refere ao sistema teste IEEE, AEP - 14, modificado pela introdução de um gerador adicional. O Sistema Sul (item 6.5) se refere a uma rede para estudos baseada no Sistema Eletrosul, com 45 barras e 57 ramos. O Sistema IEEE - 118 Barras (item 6.7) se refere ao sistema teste da IEEE constituído de 34 geradores, 91 cargas, 170 linhas (de 345 e 138 KV) e 9 transformadores com variadores de taps (tap changing).

Os resultados e análises correspondentes são apresentados para os três sistema estudados nos itens 6.3 e 6.10.

Finalmente no item 6.11 são apresentadas as principais conclusões baseados nestes resultados.

6.2 - Sistema AEP - 14 : Dados e Comentários

O Sistema AEP - 14, cujo diagrama unifilar apresenta-se na Figura 6.1, é uma modificação do Sistema IEEE, conhecido como AEP - 14, tal como utilizado por Gorenstin [15].

Este sistema se constitui de 14 barras, 21 circuitos (18 linhas de transmissão e 3 transformadores) e 3 geradores.

Os dados necessários para a utilização do Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples, a este sistema são apresentados a seguir.

- A Tabela 6.1 apresenta os dados relativos aos parâmetros dos ramos do sistema (resistência série, reatância série, susceptâncias capacitivas) bem como os limites de transmissão ou carregamento dos elementos em MVA.

- A Tabela 6.2 mostra as condições de operação do sistema para situações definidas de carga obtidas através de um fluxo de carga AC.

- A Tabela 6.3 mostra o conjunto de circuitos chaveáveis para o caso 1. A Tabela 6.4 mostra o conjunto de circuitos chaveáveis para o caso 2. A Tabela 6.5 mostra o conjunto de circuitos chaveáveis para o caso 3. Com a finalidade de obter um ponto de operação base para a Análise de Segurança no caso 1,

a Tabela 6.6 apresenta os resultados da Análise de Contingências, obtidos com auxílio de um fluxo de carga CC.

Da mesma forma se procede para obter o ponto de operação base para os caso 2 e 3, com os resultados constando das Tabelas 6.7 e 6.8.

Nestes casos as sobrecargas não puderam ser removidas com um redespacho de geração. Isto é, o DS do DGTR não apresenta solução (solução impossível) para estas situações de contingência, para os pontos de operação dados.

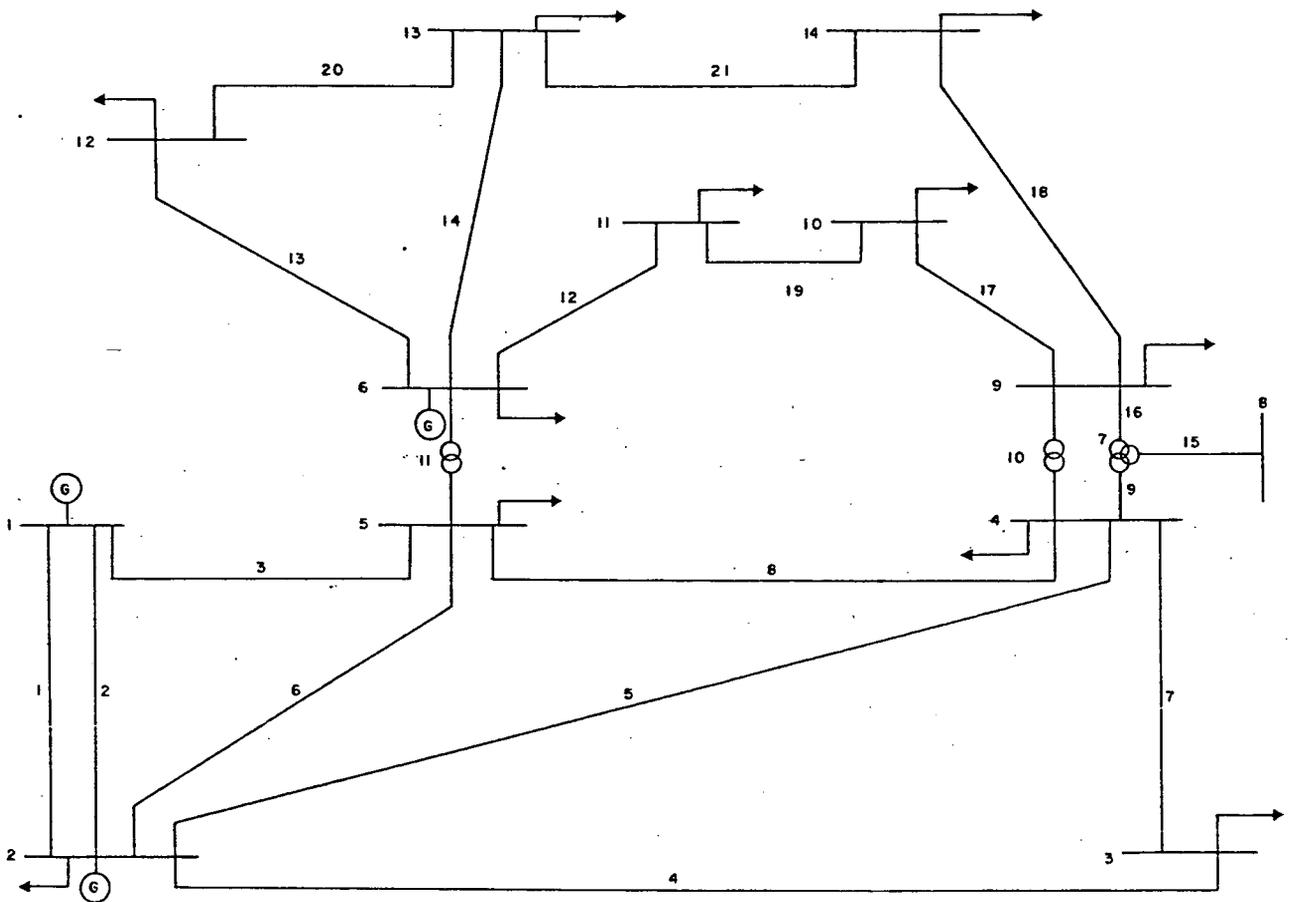


Figura 6.1 - Sistema IEEE AEP - 14 Modificado [15].

Tabela 6.1 - Parâmetros dos Elementos do Sistema AEP - 14.

Circuito Nº	Da Barra	Para Barra	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância (p.u.)	Capacida de (MVA)	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	

Observação: As resistências, reatâncias e susceptâncias estão expressas considerando-se a base de potência igual a 100 MVA.

Tabela 6.2 - Condições de Operação do Sistema AEP - 14.

Barra Nº	Tipo	GERAÇÃO		CARGA		Capacitor ou Rea- tor (MVAR)
		Ativa (MW)	Reativa (MVAR)	Ativa (MW)	Reativa (MVAR)	
1	REF	146,00		0,0	0,0	0,0
2	PV	26,00		22,80	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		11,80	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

Observação: A barra adotada como barra de referência é a barra 1.

Tabela 6.3 - Circuitos Chaveáveis para o Caso 1 Sistema AEP - 14.

Nº	Circuito Nº	Da Barra	Para Barra
1	1	1	2
2	2	1	2
3	3	1	5
4	4	2	3
5	6	2	5
6	7	3	4
7	8	4	5
8	9	4	7
9	10	4	9
10	11	5	6
11	12	6	11
12	13	6	12
13	14	6	13
14	15	7	8

Tabela 6.4 - Circuitos Chaveáveis para o Caso 2 Sistema AEP - 14.

Nº	Circuito Nº	Da Barra	Para Barra
1	1	1	2
2	3	1	5
3	4	2	3
4	5	2	4
5	6	2	5
6	7	3	4
7	8	4	5
8	9	4	7
9	10	4	9
10	11	5	6
11	12	6	11
12	17	9	6
13	20	12	13
14	21	13	14

Tabela 6.5 - Circuitos Chaveáveis para o Caso 3 Sistema
AEP - 14.

Nº	Circuito Nº	Da Barra	Para Barra
1	4	2	3
2	5	2	4
3	6	2	5
4	8	4	5
5	9	4	7
6	10	4	9
7	11	5	6
8	13	6	12
9	14	6	13
10	16	7	9
11	17	9	10
12	18	9	14
13	19	10	11
14	20	12	13

Tabela 6.6 - Lista de Sobrecargas Potenciais Associadas à Contingência em Estudo para obter o Ponto de Operação para o Caso 1 Sistema AEP - 14

Descrição da Contingência	SOBRECARGAS	
	Elementos	%
Remoção de Circuito 5	Circuito 19	51,00
	Circuito 21	21,00

Tabela 6.7 - Lista de Sobrecargas Potenciais Associadas à Contingência em Estudo para obter o Ponto de Operação para o Caso 2 Sistema AEP - 14

Descrição da Contingência	SOBRECARGAS	
	Elementos	%
Remoção do Circuito 18	Circuito 19	55,94

Tabela 6.8 - Lista de Sobrecargas Potenciais Associadas à Contingência em Estudo para obter o Ponto de Operação para o Caso 3 Sistema AEP - 14

Descrição da Contingência	SOBRECARGAS	
	Elementos	%
Remoção do Circuito 12	Circuito 21	85,49

Observação: A Contingência para o Caso 1, cuja solução foi impossível através de DS (DGTR) foi o resultado fornecido pela função Análise de Contingência, simulada por um fluxo de carga CC em [15] e confirmado aqui nestes estudos.

As Contingências para os Casos 2 e 3, foram resultados fornecidos pela função Análise de Contingência simulada através de um fluxo de carga CC neste trabalho.

6.3 - Resultados da Utilização do Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples - Subprograma 1

A seguir, a Tabela 6.9 apresenta os resultados obtidos da utilização do Algoritmo de Retirada de Circuito no Caso 1 para buscar alternativas de solução ao caso apresentado na Tabela 6.6

Tabela 6.9 - Resultados Obtidos da Utilização do Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples.

Valor de ZY da rede sobrecarregada antes de qualquer manobra: 11,5200					
MANOBRAS SIMPLES:					
Nº	Circuito Eliminado		Valor de ZY		
1	(8)		74,0427		
2	(7)		10.0401		
3	(11)		43.2406		
4	(15)		11.4537		
5	(10)		13.0828		
6	(9)		15.3663		
7	(13)		17.1436		
8	(6)		10.7302		
9	(3)		10.7902		
10	(14)		25.2702		
11	(1)		12.7911		
12	(2)		12.7811		
13	(12)		34.4701		
14	(4)		125.2429		
MANOBRA SUGERIDA:					
Nº	Circuito Eliminado	Valor de ZY	Circuitos Descarregados	Sobrecargas Persistentes	
				Circuitos	%
2	(7)	10.0401	(19)	(19)	45,91
			(21)	(21)	16.84

Com a manobra sugerida pelo Algoritmo de Retirada de Circuitos para o Caso 1, então foi realizado um DS (DGTR) [8] para tentar eliminar totalmente as sobrecargas. Os resultados foram:

Tabela 6.10 - Resultados do Despacho de Segurança.

GERAÇÃO (MW)				CARGA (MW)			
Barra	Atual	Requerida	Desvio	Barra	Atual	Requerida	Desvio
1	146,00	200,00	54,00	10	9,40	7,73	-1,67
2	26,00	10,00	-16,00				
6	100,00	60,84	-39,16				

Com a manobra sugerida pelo Algoritmo de Retirada de Circuitos (Tabela 6.9) (Sub-problema Primeiro Nível, ver item 3.3.1 - Capítulo 3) e com o Despacho de Segurança (Sub-problema Segundo Nível ver item 3.3.2 - Capítulo 3) (Tabela 6.10) as sobrecargas foram totalmente eliminadas.

Foi rodado um fluxo de carga convencional (AC) para verificar a parte reativa, cujos resultados são apresentados a seguir na Tabela 6.11.

Observar que este resultado é viável enquanto que o resultado apresentado por Gorenstin [15] apresenta sobrecargas quando submetido ao teste de verificação usando o fluxo de carga AC.

BARRAS

BARRA	NOME	TENSÃO ANGULO		GERAÇÃO		CARGA		POT. LÍQUIDA	
		MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR
1	A	1.000	.00	214.73	179.85	.00	.00	214.73	179.85
2	B	1.000	-1.72	10.00	-107.19	22.80	12.70	-12.00	-119.89
3	C	.086	-13.94	.00	.00	98.96	19.00	-98.96	-18.14
4	D	.981	-7.73	.00	.00	50.20	-3.90	-50.20	4.21
5	E	.995	-5.89	.00	.00	8.00	1.60	-8.00	.78
6	F	1.000	-6.61	61.00	23.32	11.00	7.50	49.20	15.82
7	G	.968	-9.81	.00	.00	.00	.00	.00	.00
8	H	.968	-9.81	.00	.00	.00	.00	.00	.00
9	I	.962	-10.93	.00	.00	31.00	16.60	-31.00	.96
10	J	.960	-10.44	.00	.00	7.70	5.00	-7.70	-5.80
11	K	.975	-8.68	.00	.00	3.70	1.00	-3.70	-1.00
12	L	.982	-7.90	.00	.00	6.40	1.60	-6.35	-1.60
13	M	.974	-6.23	.00	.00	14.20	5.00	-14.25	-5.00
14	N	.946	-11.00	.00	.00	15.60	5.00	-15.60	-5.00

285.73 95.99 270.30 73.50

1 F L U X O S

DA BARRA	PARA A BARRA	MW	MVAR	TAP	PERDA(MW)
1	2	80.61	80.34	.0000	2.278
2	1	-70.33	-76.19	.0000	2.278
1	2	80.61	80.34	.0000	2.278
2	1	-70.33	-76.19	.0000	2.278
1	5	53.52	19.17	.0000	1.580
5	1	-51.94	-15.24	.0000	1.580
2	3	104.92	41.57	.0000	6.016
3	2	-98.90	-18.14	.0000	6.016
2	5	38.94	-9.07	.0000	.901
5	2	-38.04	10.13	.0000	.901
4	5	-76.20	-5.99	.0000	.806
5	4	77.00	7.92	.0000	.806
4	7	16.52	6.48	.9700	.000
7	4	-16.52	-5.80	.9700	.000
4	9	9.48	3.72	.9690	.000
9	4	-9.48	-3.12	.9690	.000
5	6	4.98	-2.04	.9650	.000
6	5	-4.98	2.11	.9650	.000
6	11	19.48	3.75	.0000	.374
11	6	-19.11	-2.97	.0000	.374
6	12	9.75	2.34	.0000	.124
12	6	-9.63	-2.08	.0000	.124
6	13	24.94	7.63	.0000	.450
13	6	-24.49	-6.74	.0000	.450
7	8	.00	.00	.0000	.000
8	7	.00	.00	.0000	.000
7	9	16.52	5.80	.0000	.000
9	7	-16.52	-5.44	.0000	.000
9	10	-7.47	5.19	.0000	.028
10	9	7.50	-5.11	.0000	.028
9	14	2.47	4.35	.0000	.034
14	9	-2.44	-4.28	.0000	.034
10	11	-15.20	-.69	.0000	.206
11	10	15.41	1.17	.0000	.206
12	13	3.20	.48	.0000	.025
13	12	-3.26	-.46	.0000	.025
13	14	13.49	1.39	.0000	.332
14	13	-13.16	-.72	.0000	.332

PERDAS 15.431

ITERACOES 9

Tabela 6.11 - Resultados do Fluxo de Carga AC para o Caso Examinado.

Os resultados obtidos pela utilização do Algoritmo de Retirada de Circuitos no Caso 2, buscando uma solução ao caso apresentado na Tabela 6.7, são apresentados em seguida na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 - Resultados Obtidos da Utilização de Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples.

Valor de ZY da rede sobrecarregada antes de qualquer manobra: 8,9510					
MANOBRAS SIMPLES:					
Nº	Circuitos Eliminado			Valor de ZY	
1	(8)			37,8240	
2	(17)			0,0000	
MANOBRA SUGERIDA :					
Nº	Circuito Eliminado	Valor de ZY	Circuitos Descarregados	Sobrecargas Persistentes	
				Circuito	%
2	(17)	0,000	(19)	-	-

Neste Caso (Caso 2) a manobra por si só permitiu eliminar a sobrecarga e encontrar uma solução para o caso estudado. Utilizou-se enfim um fluxo de carga AC para verificar a parte reativa, e cujos resultados seguem abaixo.

BARRAS									
BARRA	NOME	TENSÃO ANGULO		GERAÇÃO		CARGA		POT. LÍQUIDA	
		MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR
1	A	1.066	.00	157.56	191.11	.00	.00	157.56	191.11
2	B	1.000	-1.09	26.40	-148.85	22.00	12.70	3.20	-161.55
3	C	.945	-8.54	.00	.00	98.90	19.00	-98.90	-17.25
4	D	.986	-5.17	.00	.00	50.20	-3.90	-50.20	5.96
5	E	1.001	-3.29	.00	.00	8.00	1.60	-8.00	.81
6	F	1.000	2.09	160.00	32.16	11.60	7.50	88.21	24.66
7	G	.987	-7.59	.00	.00	.00	.00	.00	.00
8	H	.987	-7.59	.00	.00	.00	.00	.00	.00
9	I	.988	-8.86	.00	.00	31.00	16.60	-31.00	1.95
10	J	.951	.16	.00	.00	9.40	5.80	-9.40	-5.80
11	K	.971	.98	.00	.00	3.70	1.80	-3.70	-1.60
12	L	.979	.76	.00	.00	6.40	1.60	-6.40	-1.60
13	M	.967	.47	.00	.00	14.20	5.00	-14.16	-5.00
14	N	.918	-2.49	.00	.00	15.60	5.00	-15.60	-5.00
				283.56	74.41	272.00	73.50		
FLUXOS									
DA BARRA	PARA A BARRA	MW	MVAR	TAP	PERDA(MW)				
1	2	62.57	85.77	.0000	1.990				
2	1	-60.56	-82.50	.0000	1.990				
1	2	62.57	85.77	.0000	1.990				
2	1	-60.56	-82.50	.0000	1.990				
1	5	32.35	19.57	.0000	.714				
5	1	-31.64	-19.24	.0000	.714				
2	3	65.80	15.35	.0000	2.158				
3	2	-63.65	-8.32	.0000	2.158				
2	4	38.65	-4.35	.0000	.875				
4	2	-37.78	5.16	.0000	.875				
2	5	19.90	-7.57	.0000	.251				
5	2	-19.65	6.63	.0000	.251				
3	4	-35.25	-8.93	.0000	.983				
4	3	36.24	9.83	.0000	.983				
4	5	-79.66	-9.08	.0000	.879				
5	4	80.54	11.23	.0000	.879				
4	7	19.70	.04	.9760	.000				
7	4	-19.70	.00	.9760	.000				
4	9	11.30	.02	.9690	.000				
9	4	-11.30	.71	.9690	.000				
5	6	-37.25	2.18	.9650	.000				
6	5	37.25	1.32	.9650	.000				
6	11	13.45	8.36	.0000	.238				
11	6	-13.21	-7.86	.0000	.238				
6	12	10.51	3.29	.0000	.149				
12	6	-10.36	-2.98	.0000	.149				
6	13	27.01	11.70	.0000	.573				
13	6	-26.43	-10.57	.0000	.573				
7	8	.00	.00	.0000	.000				
8	7	.00	.00	.0000	.000				
7	9	19.70	-1.80	.0000	.000				
9	7	-19.70	1.24	.0000	.000				
10	11	-9.40	-5.80	.0000	.111				
11	10	9.51	6.06	.0000	.111				
12	13	3.92	1.38	.0000	.040				
13	12	-3.88	-1.34	.0000	.040				
13	14	16.14	6.11	.0000	.544				
14	13	-15.60	-5.00	.0000	.544				
PERDAS 11.494									
ITERACOES 6									

Tabela 6.13 - Resultados do Fluxo de Carga AC para o Caso Examinado.

Apresentam-se em seguida, na Tabela 6,14 os resultados obtidos pela utilização do Algoritmo de Retirada de Circuito no Caso 3, buscando uma solução ao caso apresentado na Tabela 6.8.

Tabela 6.14 - Resultados Obtidos de Utilização de Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples.

Valor de ZY da rede sobrecarregada antes de qualquer manobra: 13,6795					
MANOBRAS SIMPLES:					
Nº	Circuito Eliminado			Valor de ZY	
1	(9)			57,5212	
2	(11)			105,9966	
3	(18)			0,0000	
Nº	Circuito Eliminado	Valor de ZY	Circuitos Descarregados	Sobrecargas Persistentes	
				Circuitos	%
3	(18)	0,000	(21)	-	-

Neste Caso (Caso 3) como Caso 2 a manobra por si só, permitiu eliminar a sobrecarga e encontrar uma solução para o caso estudado.

Utilizou-se um fluxo de carga convencional AC para verificar a parte reativa, e cujos resultados seguem abaixo.

BARRAS									
BARRA	NOME	TENSÃO ANGULO	G E N E R A D O R		C A R G A		P E R D I D O S		A
			MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR	
1	A	1.000	.00	157.65	193.21	.00	.00	157.65	193.21
2	B	1.000	-1.11	29.00	-120.45	22.80	12.70	0.10	-131.15
3	C	.946	-5.64	.00	.00	52.50	19.00	-92.90	-17.27
4	D	.977	-5.23	.00	.00	19.20	-2.10	-21.30	5.92
5	E	.952	-5.10	.00	.00	8.00	1.00	-2.00	.72
6	F	1.000	4.27	150.00	27.24	11.80	7.10	68.10	19.74
7	G	.964	-8.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
8	H	.944	-8.20	.00	.00	.00	.00	.00	.00
9	I	.950	-10.72	.00	.00	.00	.00	.00	.00
10	J	.947	-11.27	.00	.00	31.00	10.00	-10.00	.00
11	K	.946	-11.63	.00	.00	9.40	3.60	-3.60	-2.80
12	L	.979	2.93	.00	.00	0.40	1.00	-0.70	-1.00
13	M	.967	2.65	.00	.00	14.20	0.00	-14.00	-0.00
14	N	.918	-3.31	.00	.00	15.00	0.00	-15.00	-0.00
			293.63	82.00	372.00	30.50			
FLUXO									
DA BARRA	PARA A BARRA	MW	MVAR	TAP	PERDA(MW)				
1	2	63.19	85.50	.0000	1.992				
2	1	-61.19	-82.23	.0000	1.992				
1	2	63.19	85.50	.0000	1.992				
1	1	-61.19	-82.23	.0000	1.992				
1	5	31.24	22.80	.0000	.720				
5	1	-30.51	-21.63	.0000	.720				
2	6	22.72	17.71	.0000	2.254				
3	2	-24.47	-10.26	.0000	2.254				
2	4	40.19	.14	.0000	.933				
4	2	-39.25	.86	.0000	.933				
2	5	10.61	-4.46	.0000	.220				
5	2	-10.46	3.39	.0000	.220				
3	4	-34.40	-7.01	.0000	.929				
4	3	35.01	7.79	.0000	.929				
4	5	-90.51	-14.17	.0000	1.120				
5	4	91.00	17.25	.0000	1.120				
4	7	28.00	7.27	.9700	.000				
7	4	-28.00	-5.43	.9700	.000				
4	9	16.11	4.17	.9200	.000				
9	4	-16.11	-2.53	.9200	.000				
5	1	-50.69	1.77	.9250	.000				
6	1	50.69	4.76	.9250	.000				
6	12	10.51	3.29	.0000	.145				
12	6	-10.36	-2.90	.0000	.145				
6	13	20.99	11.70	.0000	.572				
13	6	-20.42	-10.57	.0000	.572				
7	8	.00	.00	.0000	.000				
8	7	.00	.00	.0000	.000				
7	9	20.02	5.43	.0000	.000				
9	7	-20.00	-4.46	.0000	.000				
9	10	13.20	7.05	.0000	.000				
10	9	-13.12	-7.04	.0000	.000				
10	11	3.72	1.04	.0000	.000				
11	10	-3.70	-1.00	.0000	.000				
12	13	3.92	1.30	.0000	.000				
13	12	-3.58	-1.04	.0000	.000				
13	14	16.15	0.11	.0000	.544				
14	13	-15.00	-0.00	.0000	.544				
PERDAS 11.420									
ITERACOES 2									

Tabela 6.15 - Resultados do Fluxo de Carga AC para o Caso Estudado.

A seguir na Tabela 6.16, apresentam-se os tempos de cálculo, para obtenção dos resultados utilizando o Algoritmo de Retirada de Circuitos aos casos mostrados nas Tabelas, 6.9, 6.12, 6.14, obtidos sobre um microcomputador I - 7000 PCxt da Itautec do Laboratório de Sistemas de Potência (LABSPOT) do Departamento de Engenharia Elétrica (EEL) do Centro Tecnológico da UFSC.

Tabela 6.16 - Tempos de Cálculo Sistema AEP - 14.

Caso Nº	Número de Iterações	* Tempos de Cálculo (seg)
1	14	4,94
2	2	0,99
3	3	1,21

Apenas para dar uma idéia

* Entre 10 e 15 vezes superiores aos tempos de cálculo da IBM 4341 e cerca de 5 a 7 vezes maiores que os tempos de cálculo do VAX/780.

Os tempos obtidos por Gorenstin [15] para o caso 1 foram: No modelo PLM 14,48 seg num IBM 4341. No modelo compacto 1,42 seg num VAX/VMS - 780.

6.4 - Análise Dos Resultados para os Casos Estudados sobre o Sistema AEP - 14

Foram estudados três casos para avaliar o comportamento do Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples - Subprograma 1, que representa o sub-problema do primeiro nível que seria a determinação da melhor alternativa de mudança topológica da rede.

No caso 1 a manobra m_1^* não foi suficiente para eliminar as violações dos limites operacionais dos elementos sobrecarregados, nesse caso, foi aplicado um Despacho de Segurança (Sub-problema do Segundo Nível) para solucionar o problema.

Nos casos 2 e 3 as manobras m_1^* foram suficientes para lograr eliminar as ultrapassagens dos limites operacionais dos elementos.

Em todos os casos a parte reativa foi verificada através de um fluxo de carga AC.

Observação: O fluxo de potência AC rodado para verificar a parte reativa nos exemplos estudados sobre o Sistema AEP - 14, um fluxo de carga desacoplado rápido.

6.5 - Sistema Sul : Dados e Comentários

O Sistema Sul, cujo diagrama unifilar apresenta-se na Figura 6.2, é um equivalente estático de uma possível configuração para estudos do Sistema do Sul do Brasil e que já foi utilizado por Aguilar [8]. Este sistema é constituído de 45 barras, 57 ramos e 10 geradores.

Os dados necessários para a utilização do Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples - Subprograma 1 para o Sistema Sul (Figura 6.2) são apresentados a seguir.

- A Tabela 6.17 apresenta os dados relativos aos parâmetros dos ramos do sistema (dados obtidos da referência [8]).

- A Tabela 6.18 mostra as condições de operação do sistema (dados obtidos da referência [8]).

- A Tabela 6.19 mostra o conjunto de circuitos chaveáveis para o Caso 1 e a Tabela 6.20 mostra o conjunto de circuitos chaveáveis para o Caso 2.

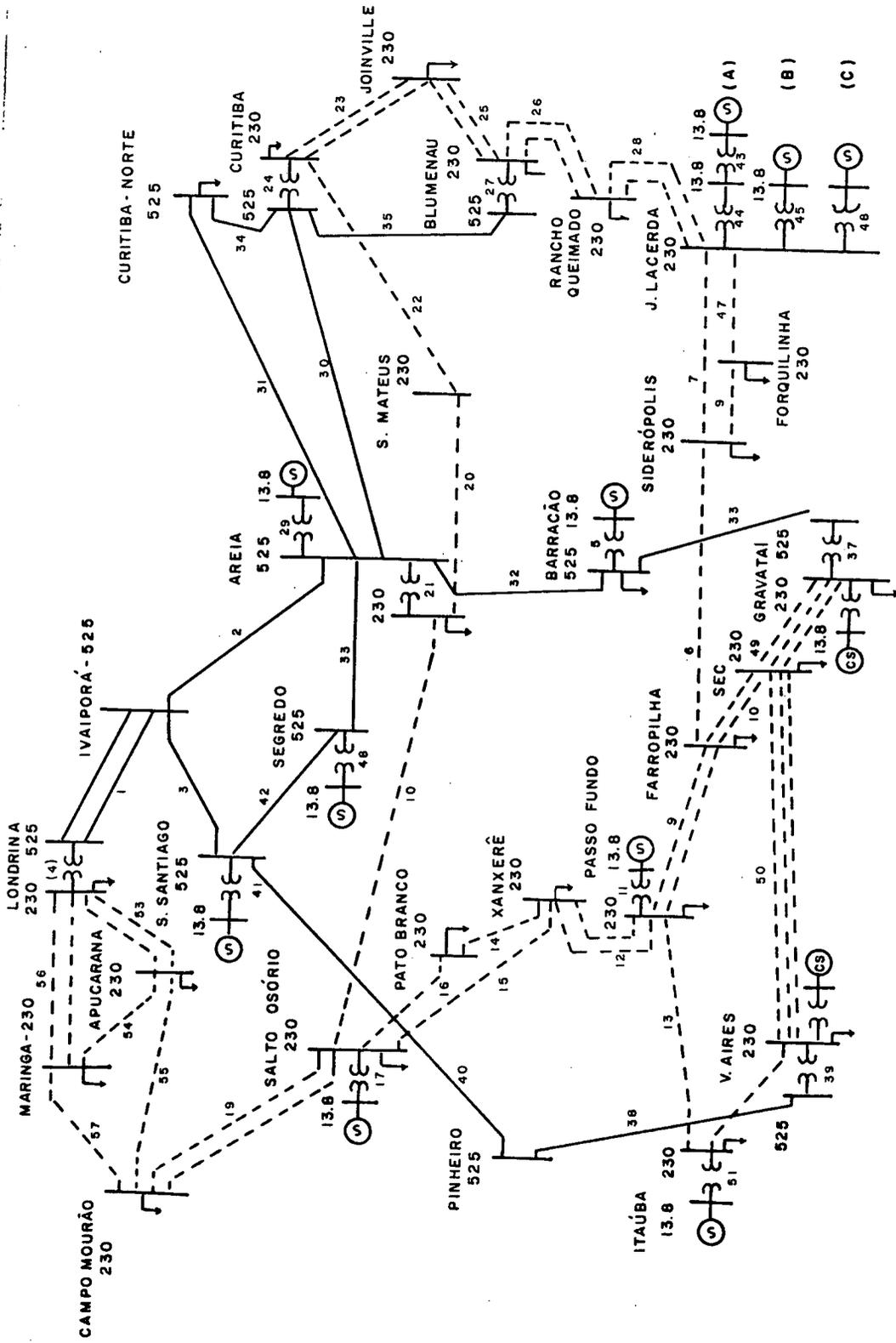


Figura 6.2 - Sistema Sul. Uma Configuração Provável [8].

Os Casos 1 e 2 estudados, são respectivamente, o caso nº 4 e caso nº 6 obtidos da referência [8] os quais não apresentaram solução logo após a aplicação da função DS (DGTR) e cujos dados são mostrados nas Tabelas 6.21 e 6.22.

Tabela 6.17 - Parâmetros dos Elementos do Sistema Sul.

Ramo Nº	Da Barra	Para Barra	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância (p.u.)	Capacidade (MVA) Estado Normal
1	343	344	0,0350	0,7250	3,3220	3440,00
2	343	382	0,1800	2,2700	2,2721	1720,00
3	343	391	0,1400	2,0400	2,4475	1720,00
4	344	431	0,0000	0,6300	0,0000	1800,00
5	366	386	0,0000	1,3600	0,0000	810,00
6	367	368	3,8600	19,8500	0,3400	270,00
7	367	396	0,9600	4,9100	0,0842	270,00
8	367	437	0,3300	1,6700	0,2859	270,00
9	368	370	2,3150	11,8900	0,8168	270,00
10	368	399	0,8850	4,5500	0,3170	270,00
11	369	370	0,0000	4,6000	0,0000	270,00
12	370	371	0,8150	4,1750	0,2880	400,00
13	370	408	2,5000	15,4800	0,4690	270,00
14	371	372	1,6300	8,3500	0,1440	260,00
15	371	374	3,1600	16,2100	0,2784	270,00
16	372	374	1,5300	8,6100	0,1344	270,00
17	373	374	0,0000	1,2400	0,0000	1200,00
18	374	375	3,0600	15,2300	0,2702	520,00
19	374	433	1,7200	8,8000	0,6080	470,00

Continua ...

Continuação Tabela 6.17

Ramo Nº	Da Barra	Para Barra	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância (p.u.)	Capacidade (MVA) Estado Normal
20	375	376	2,4500	12,5600	0,2041	260,00
21	375	382	0,0000	3,0000	0,0000	600,00
22	376	377	0,8800	4,1500	0,5211	260,00
23	377	378	0,9200	4,6750	0,3190	520,00
24	377	383	0,0000	0,6200	0,0000	1800,00
25	378	379	0,7700	3,8800	0,2700	790,00
26	379	380	1,0800	5,5250	0,3726	540,00
27	379	385	0,0000	0,6200	0,0000	1800,00
28	380	396	0,9000	4,6000	0,3106	540,00
29	381	382	0,0000	0,6700	0,0000	3600,00
30	382	383	0,1900	2,8000	3,3576	1720,00
31	382	384	0,1900	2,7400	3,2867	1720,00
32	382	386	0,1400	1,9500	2,3968	1720,00
33	382	398	0,0500	0,7000	0,8392	1720,00
34	383	384	0,0500	0,6900	0,8216	1720,00
35	383	385	0,1200	1,7500	2,0970	1720,00
36	386	387	0,2100	3,0900	3,7183	1720,00
37	387	402	0,0000	0,6200	0,0000	2400,00
38	388	389	0,2200	3,0000	3,8300	1720,00
39	388	414	0,0000	0,6200	0,0000	1200,00
40	389	391	0,1400	1,9500	2,3970	1720,00
41	390	391	0,0000	1,1400	0,0000	1800,00
42	391	398	0,0500	0,7000	0,8392	1720,00
43	392	393	0,0000	8,7100	0,0000	200,00

Continua ...

Continuação Tabela 6.17

Ramo Nº	Da Barra	Para Barra	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância (p.u.)	Capacidade (MVA) Estado Normal
44	393	396	0,0000	5,9000	0,0000	200,00
45	394	396	0,0000	7,0100	0,0000	200,00
46	395	396	0,0000	4,5000	0,0000	280,00
47	396	437	1,2900	6,5700	0,1128	260,00
48	397	398	0,0000	0,6800	0,0000	2700,00
49	399	402	0,0697	0,3582	0,0668	810,00
50	399	414	0,6073	3,1612	0,5236	780,00
51	407	408	0,0000	3,3600	0,0000	556,00
52	408	414	2,0200	11,2900	0,2062	270,00
53	430	431	0,5199	2,6815	0,1905	470,00
54	430	432	1,1000	11,8400	0,2027	270,00
55	430	433	2,2900	11,7400	0,2027	270,00
56	431	432	0,8600	4,4200	0,2868	540,00
57	432	433	1,8100	9,2900	0,1607	448,00

Observação: Os dados dos ramos que representam linhas em paralelo, são os equivalentes destas linhas. Dos 57 ramos que formam o sistema, 12 representam linhas duplas (ramos 1, 9, 10, 12, 19, 23, 25, 26, 28, 53 e 56) e 2 representam linhas triplas (ramos 49 e 50). A base adotada é de 100 MVA.

Tabela 6.18 - Condições de Operação do Sistema Sul.

Barra Nº	Nome	Tipo	GERAÇÃO		CARCA		Capacitor Ou Reator (MVAR)
			Ativa (MW)	Reativa (MVAR)	Ativa (MW)	Reativa (MVAR)	
366	Barração 13,8	PV	650,00	-26,30	0,00	0,00	0,00
396	P.Fundo 13,8	PV	215,00	70,70	0,00	0,00	0,00
373	S.Osório 13,8	PV	1050,00	151,10	0,00	0,00	0,00
381	F. Areia 13,8	PV	1110,00	-10,70	0,00	0,00	0,00
390	S.Santiago 13,8	PV	1325,00	-44,70	0,00	0,00	0,00
392	J.Lacerda A	PV	90,00	45,30	0,00	0,00	0,00
394	J.Lacerda B 13,8	PV	120,00	54,20	0,00	0,00	0,00
395	J.Lacerda C	PV	241,00	89,50	0,00	0,00	0,00
397	Segredo 13,8	REF	1357,50	-55,70	0,00	0,00	0,00
407	Itauba 13,8	PV	490,00	87,70	00,00	0,00	0,00
367	Sideropolis 230	PQ	0,00	0,00	177,00	68,00	0,00
376	S.Mateus 230	PQ	0,00	0,00	130,00	29,40	0,00
384	Cur. Norte 525	PQ	0,00	0,00	368,00	69,60	-150,00
385	Blumenau 525	PQ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
387	Gravatá 525	PQ	0,00	0,00	0,00	0,00	-150,00
388	V. Aires 525	PQ	0,00	0,00	0,00	0,00	-150,00
389	Pinheiro 525	PQ	0,00	0,00	0,00	0,00	-150,00
393	J.Lacerda 138	PQ	0,00	0,00	126,00	39,80	0,00
437	Forquilha 230	PQ	0,00	0,00	90,10	55,30	0,00
372	P. Branco 230	PQ	0,00	0,00	46,00	14,70	0,00
375	Areia 230	PQ	0,00	0,00	279,00	60,70	0,00
386	Barracão 525	PQ	0,00	0,00	174,00	-8,20	-100,00
398	Segredo 525	PQ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
408	Itaubá 230	PQ	0,00	0,00	403,60	134,90	0,00

Continua ...

Continuação Tabela 6.18

Barra Nº	Nome	Tipo	GERAÇÃO		CARGA		Capacitor Ou Reator (MVAR)
			Ativa (MW)	Reativa (MVAR)	Ativa (MW)	Reativa (MVAR)	
344	Londrina 525	PQ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
371	Xanxerê 230	PQ	0,00	0,00	126,00	47,00	0,00
377	Curitiba 230	PQ	0,00	0,00	427,00	-25,00	0,00
378	Joinville 230	PQ	0,00	0,00	310,00	141,00	0,00
380	R. Queimado 230	PQ	0,00	0,00	117,00	53,10	0,00
383	Curitiba	PQ	0,00	0,00	0,00	0,00	-150,00
391	S.Santiago 525	PQ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
430	Apucarana 230	PQ	0,00	0,00	262,00	13,20	0,00
432	Maringá 230	PQ	0,00	0,00	184,00	60,20	0,00
433	C. Mourão 230	PQ	0,00	0,00	139,00	53,70	0,00
343	Ivaiporã 525	PQ	0,00	0,00	0,00	0,00	-200,00
368	Farroupilha 230	PQ	0,00	0,00	190,70	42,00	0,00
379	Blumenau 230	PQ	0,00	0,00	424,00	90,60	0,00
402	Gravatá 230	PQ	0,00	0,00	612,00	-455,00	0,00
414	V. Aires 230	PQ	0,00	0,00	393,00	-111,00	0,00
431	Londrina 230	PQ	0,00	0,00	229,00	183,00	0,00
370	P. Fundo 230	PQ	0,00	0,00	171,00	18,50	0,00
374	S. Osório 230	PQ	0,00	0,00	281,00	56,50	0,00
382	Areia 525	PQ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
396	J.Lacerda 230	PQ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
399	CECI 230	PQ	0,00	0,00	813,00	110,00	0,00

Observação: A barra 397 foi escolhida como barra de referência.

Tabela 6.19 - Circuitos Chaveáveis para o Caso1 Sistema Sul.

Nº	Circuito Nº	Da Barra	Para Barra
1	6	367	368
2	7	367	396
3	12	370	371
4	13	370	408
5	14	371	372
6	15	371	374
7	16	372	374
8	18	374	375
9	20	375	376
10	22	376	377
11	23	377	378
12	25	378	379
13	26	379	380
14	28	380	396

Tabela 6.20 - Circuitos Chaveáveis para o Caso (2 Sistema Sul.

Nº	Circuito Nº	Da Barra	Para Barra
1	6	367	368
2	7	367	396
3	9	368	370
4	10	368	399
5	12	370	371
6	14	371	372
7	15	371	374
8	16	372	374
9	18	374	375
10	20	375	376
11	22	376	377
12	25	378	379
13	26	379	380
14	28	380	396

Tabela 6.21 - Lista de Sobrecargas Potenciais associadas à contingência em Estudo para Obter o Ponto de Operação para o Caso 1 Sistema Sul.

Descrição da Contingência	SOBRECARGAS	
	Elementos	%
Remoção do Ramo 50	Ramo (9)	16,00

Tabela 6.22 - Lista de Sobrecargas Potenciais Associadas a Contingência em Estudo para Obter o Ponto de Operação para o Caso 2 Sistema Sul.

Descrição da Contingência	SOBRECARGAS	
	Elementos	%
Remoção de uma linha do ramo duplo (9)	Ramo (9)	14,57
Remoção de uma linha do ramo duplo (10)		

Observação: Estes dois casos de Contingência cuja solução foi impossível através de DS (DGTR) foram resultados fornecidos pela função Análise de Contingências, simuladas por um "fluxo de carga CC" em [8] e confirmados aqui nestes estudos.

6.6 - Resultados da Utilização do Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples - Subprograma 1 sobre o Sistema Sul

Na Tabela 6.23 são apresentados os resultados obtidos da utilização do Algoritmo de Retirada de Circuitos no Caso 1 (caso nº 4 da referência [8]).

Tabela 6.23 - Resultados Obtidos da Utilização do Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples.

Valor de ZY da rede sobrecarregada antes de qualquer manobra: 43,2358					
MANOBRAS SIMPLES:					
Nº	circuito Eliminado			Valor de ZY	
1	(12)			24,8849	
2	(16)			2,4208	
3	(14)			0,0000	
MANOBRA SUGERIDA:					
Nº	Circuito Eliminado	Valor de ZY	Circuitos Descarregados	Sobrecargas Persistentes	
				Circuitos	%
3	(14)	0,0000	(9)	-	-

Neste caso (caso nº 4 da referência [8]) a manobra por si só, permitiu eliminar a sobrecarga e encontrar uma solução para o caso estudado.

Como sempre, foi utilizado um fluxo de carga AC para verificar a parte reativa. Os resultados dos fluxos de carga correspondentes não serão apresentados a partir daqui no texto por razão de economia, apesar da relevância destes pa

ra efeitos de implementação dos resultados na prática.

Os resultados obtidos pela aplicação do Algoritmo de Retirada de Circuitos ao Caso 2 (caso nº 6 da referência [8]), são apresentados na Tabela 6.24.

Tabela 6.24 - Resultados Obtidos da Utilização do Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples.

Valor de ZY da rede sobrecarregada antes de qualquer manobra: 19,6700					
MANOBRAS SIMPLES:					
Nº	Circuito Eliminado			Valor de ZY	
1	(12)			89,4578	
2	(16)			1,0913	
3	(28)			0,0000	
MANOBRA SUGERIDA:					
Nº	Circuito Eliminado	Valor de ZY	Circuitos Descarregados	Sobrecargas Persistentes	
				Circuito	%
3	(28)	0,0000	(9)	-	-

Neste caso (caso nº 6 da referência [8]). A manobra foi suficiente para eliminar a sobrecarga e encontrar uma solução para a situação em estudo.

Os resultados do fluxo de carga AC mostram que esta solução é realmente eficaz.

A seguir, na Tabela 6.25, apresentam-se os tempos de cálculo resultantes da utilização do Algoritmo de Retirada de Circuitos aos Casos, mostrados nas Tabelas 6.23 e 6.24, obtidos sobre um microcomputador I - 7000 PCxt da Itaotec do Laboratório de Sistemas de Potência (LABSPOT) da ELL - CTC/UFSC.

Tabela 6.25 - Tempos de Cálculo Sistema Sul.

Caso Nº	Número de Iterações	* Tempo de ** Cálculo (seg)
1	3	5,21
2	3	5,32

* Os tempos de cálculo sobre o IBM 4341 são cerca de 10 a 15 vezes menores.

** Os tempos de cálculo sobre VAX/780 são de 5 a 7 vezes menores.

6.7 - Análise dos Resultados para os Casos Estudados sobre o Sistema Sul

No Caso 1 a manobra m_1^* foi suficiente para eliminar a ultrapassagem do limite operacional do elemento sobre carregado. Da mesma forma aconteceu no Caso 2.

Em ambos Casos foi realizado um fluxo de carga AC para verificar a parte reativa.

Observação: O fluxo de potência AC para verificar a parte reativa nos Casos estudados sobre o Sistema Sul foi: Programa para estudos de Fluxo de Potência, Programa Powermod versão 1.1 implantado no IBM 43 41 Núcleo de Processamento de Dados NPD da UFSC.

6.8 - Sistema IEEE - 118 Barras: Dados e Comentários

O sistema IEEE - 188 barras, cujo diagrama unifilar apresenta-se na Figura 6.3, é o sistema teste da IEEE constituído de 188 barras, 179 circuitos (170 linhas de 345 e 138 KV; e 9 transformadores com variadores de taps), 34 geradores e 91 cargas.

Os dados necessários para a utilização do Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples - Subprograma 1 neste sistema são apresentados a seguir.

A Tabela 5.26 apresenta uma amostra dos dados relativos aos parâmetros dos ramos do sistema (resistência série, reatância série, susceptâncias capacitivas) bem como a capacidade de carregamento dos elementos. Estes dados estão disponíveis na literatura e serão omitidos neste texto.

A Tabela 6.27 mostra um extrato das condições de operação do sistema para situações definidas de carga obtidos através de um fluxo de carga AC. Cujos resultados também são omitidos, tendo em vista tornar o texto mais compacto.

A Tabela 6.28 mostra o conjunto de circuitos chaveáveis para o Caso 1. A Tabela 6.29 mostra o conjunto de circuitos chaveáveis para o Caso 2. A tabela 6.30 mostra o conjunto de circuitos chaveáveis para o Caso 3.

Com a finalidade de se obter um ponto de operação base para a Análise de Segurança no Caso 1, a Tabela 6.31 apresenta os resultados da Análise de Contingências obtidos com auxílio de um fluxo de carga CC.

Da mesma forma se procede para obter o ponto de

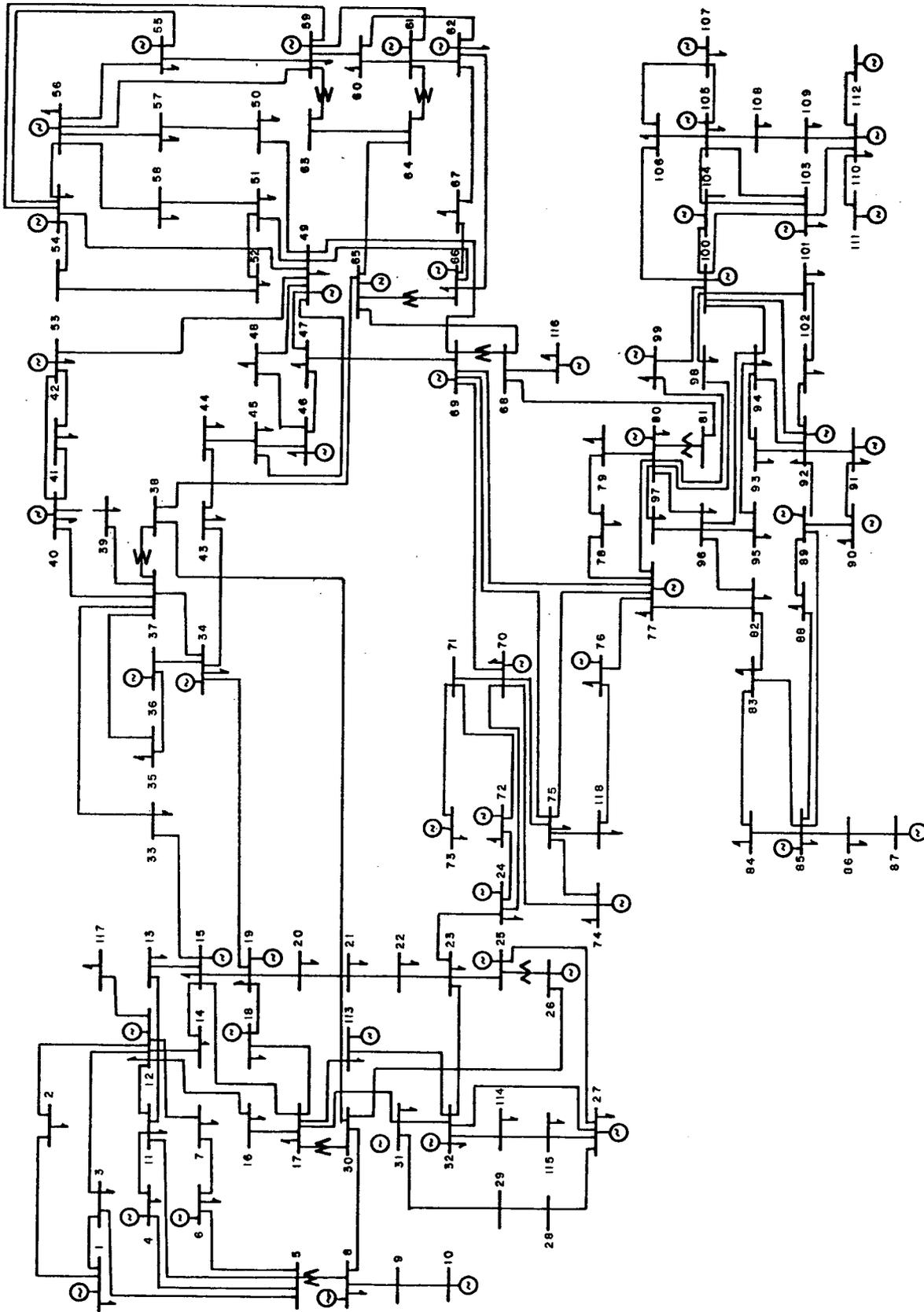


Figura 6.3 - Sistema IEEE - 118 Barras.

operação base para os Casos 2 e 3, com os resultados constando das Tabelas 6.32 e 6.33.

Tabela 6.26 - Parâmetros dos Elementos do Sistema IEEE 118 Barras. Amostra dos Dados.

Circuito Nº	Da Barra	Para Barra	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância (p.u.)	Capacidade de Carregamento em Corrente (P.u.)	Tap (p.u.)
1	1	2	0,0303	0,0999	0,0127	1,44	
2	1	3	0,0129	0,0424	0,0054	1,44	
3	2	12	0,0187	0,0616	0,0078	1,44	
4	3	5	0,0241	0,1080	0,0142	3,50	
5	3	12	0,0484	0,1600	0,0203	1,44	
6	4	11	0,0209	0,0688	0,0087	1,44	
7	4	5	0,0018	0,0080	0,0070	3,10	
8	5	11	0,0203	0,0682	0,0087	1,44	
9	5	6	0,0119	0,0540	0,0071	1,75	
10	6	7	0,0045	0,0208	0,0027	1,75	
11	7	12	0,0086	0,0340	0,0043	1,60	
12	8	30	0,0043	0,0504	0,2570	7,76	
13	8	5	0,00	0,0267	0,00		0,985
14	8	9	0,0024	0,0305	0,5810	15,5	
15	9	10	0,0026	0,0322	0,6150	15,5	
16	11	12	0,0059	0,0196	0,0025	1,44	
17	11	13	0,0222	0,0731	0,0094	1,44	
18	12	16	0,0212	0,0834	0,0107	1,60	
19	12	117	0,0329	0,1400	0,0179	1,60	
20	12	14	0,0215	0,0707	0,0091	1,44	

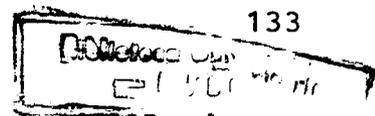


Tabela 6.27 - Condições de Operação do Sistema IEEE - 118 Barras
Amostra dos Resultados do Fluxo de Carga AC.

Barra Nº	Tipo	GERAÇÃO		CARGA		Capacitor ou Reator (p.u.)
		Ativa (MW)	Reativa (MVAR)	Ativa (MW)	Reativa (MVAR)	
1	PQ	0,00	0,00	51,00	27,00	0,00
2	PQ	0,00	0,00	20,00	9,00	0,00
3	PQ	0,00	0,00	39,00	10,00	0,00
4	PV	-9,00		30,00	12,00	0,00
5	PQ	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,400
6	PQ	0,00	0,00	52,00	22,00	0,00
7	PQ	0,00	0,00	19,00	2,00	0,00
8	PQ	-23,00	0,00	19,00	2,00	0,00
9	PQ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	PV	450,00		0,00	0,00	0,00
11	PQ	0,00	0,00	70,00	23,00	0,00
12	PV	85,00		47,00	10,00	0,00
13	PQ	0,00	0,00	34,00	16,00	0,00
14	PQ	0,00	0,00	14,00	1,00	0,00
15	PQ	0,00	0,00	90,00	30,00	0,00
16	PQ	0,00	0,00	25,00	10,00	0,00
17	PQ	0,00	0,00	11,00	3,00	0,00
18	PQ	0,00	0,00	60,00	34,00	0,00
19	PQ	0,00	0,00	45,00	25,00	0,00
20	PQ	18,00	0,00	18,00	3,00	0,00
21	PQ	0,00	0,00	14,00	8,00	0,00
22	PQ	0,00	0,00	10,00	5,00	0,00
23	PQ	0,00	0,00	7,00	3,00	0,00

Tabela 6.28 - Circuitos Chaveáveis para o Caso 1.
Sistema IEEE - 118 Barras.

Nº	Circuito	Da Barra	Para Barra
1	27	17	113
2	28	17	18
3	30	18	19
4	31	19	20
5	33	20	21
6	34	21	22
7	35	22	23
8	52	32	113
9	53	32	114
10	179	114	115
11	45	27	115
12	41	25	27

Tabela 6.29 - Circuitos Chaveáveis para o Caso 2.
Sistema IEEE - 118 Barras.

Nº	Circuito	Da Barra	Para Barra
1	146	89	90
2	143	85	89
3	139	83	85
4	137	82	83
5	136	82	96
6	158	95	96
7	155	94	95
8	154	93	94
9	150	92	93
10	149	91	92

Tabela 6.30 - Circuitos Chaveáveis para o Caso 3.
Sistema IEEE - 118 Barras.

Nº	Circuito	Da Barra	Para Barra
1	36	23	32
2	41	25	27
3	44	27	32
4	45	27	115
5	53	32	114
6	179	114	115

Tabela 6.31 - Lista de Sobrecargas Potenciais Associadas à Contingência em Estudo para obter o Ponto de Operação para o Caso 1. Sistema IEEE - 118 Barras.

Descrição da Contingência	SOBRECARGAS	
	Elementos	%
Remoção do Circuito 13	Circuito 38	0,32

Tabela 6.32 - Lista de Sobrecargas Potenciais Associadas à Contingência em Estudo para obter o Ponto de Operação para o Caso 2. Sistema IEEE - 118 Barras.

Descrição da Contingência	SOBRECARGAS	
	Elementos	%
Remoção do Circuito 147	Circuito 148	0,69

Tabela 6.33 - Lista de Sobrecargas Potenciais Associadas à Contingência em Estudo para obter o Ponto de Operação para o Caso 3. Sistema IEEE - 118 Barras.

Descrição da Contingência	SOBRECARGAS	
	Elementos	%
Remoção do Circuito 43	Circuito 38	65,11

Observação: As contingências para os Casos 1, 2 e 3, foram resultados fornecidos pela função Análise de Contingência simulada através de um fluxo de carga CC neste trabalho.

6.9 - Resultados da Utilização do Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples - Subprograma 1 sobre o Sistema de 118 - Barras IEEE

A seguir, na Tabela 6.34 são apresentados os resultados obtidos da utilização do Algoritmo de Retirada de Circuitos no Caso 1 para encontrar alternativas de solução ao caso apresentado na Tabela 6.31.

Tabela 6.34 - Resultados Obtidos da Utilização do Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples.

Valor de ZY da rede sobrecarregada antes de qualquer manobra: 0,5963					
MANOBRAS SIMPLES:					
Nº	Circuito Eliminado			Valor de ZY	
1	(34)			0,000	
MANOBRA SUGERIDA:					
Nº	Circuito Eliminado	Valor de ZY	Circuitos Descarregados	Sobrecargas Persistentes	
				Circuito	%
1	(34)	0,0000	38	-	-

Neste Caso (Caso 1) a manobra por si só permitiu eliminar a sobrecarga e encontrar uma solução para o caso estudado. Utilizou-se um fluxo de carga AC para verificar a parte reativa, como sempre, com os resultados mostrando que a solução é perfeitamente viável.

Apresentam-se em seguida, na Tabela 6.35 os resultados obtidos da utilização do Algoritmo de Retirada de Circuitos no Caso 2, buscando uma solução ao caso apresentado na Tabela 6.32.

Tabela 6.35 - Resultados Obtidos da Utilização do Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples.

Valor de ZY da rede sobrecarregada antes de qualquer manobra: 1,0009					
MANOBRAS SIMPLIS:					
Nº	circuito Eliminado			Valor de ZY	
1	(137)			342,1370	
2	(143)			168,0174	
3	(139)			53,8868	
4	(158)			4,2303	
5	(155)			0,5221	
6	(154)			0,0000	
MANOBRA SUGERIDA:					
Nº	Circuito Eliminado	Valor de ZY	Circuitos Descarregados	Sobrecargas Persistentes	
				Circuito	%
6	(154)	0,0000	(148)	-	-

Neste exemplo (Caso 2) como no Caso 1 a manobra por si só, permitiu eliminar a sobrecarga e encontrar uma solução para o caso estudado. Utilizou-se um fluxo de carga AC para verificar a parte reativa e a solução apresentou-se perfeitamente viável.

Finalmente, a Tabela 6.36 apresenta os resultados obtidos da utilização do Algoritmo de Retirada de Circuitos no Caso 3, buscando uma solução ao caso apresentado na Tabela 6.33.

Tabela 6.36 - Resultados Obtidos da Utilização de Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples.

Valor de ZY da rede sobrecarregada antes de qualquer manobra: 121,7578					
MANOBRAS SIMPLES: 121,7578					
Nº	Circuito Eliminado			Valor de ZY	
1	(179)			111,0259	
2	(53)			109,8333	
3	(44)			119,4099	
4	(45)			114,3010	
5	(36)			31,3002	
6	(41)			348,5989	
MANOBRA SUGERIDA:					
Nº	Circuito Eliminado	Valor de ZY	Circuitos Descarregados	Sobrecargas Persistentes	
				Circuitos	%
5	(36)	31,3002	(38)	(38)	16,74

Com a manobra sugerida pelo Algoritmo de Retirada de Circuitos para o Caso 3, então foi realizado um DS (DGTR) [8] para tentar eliminar totalmente a sobrecarga. Neste caso foram realizados 10 DS e não foi conseguido eliminar a sobrecarga; por isto, foi feita a abertura dos limites de carregamento dos trânsitos (tal como sugerido em [11]), 5%, 10% e 20%.

Com 20% de abertura dos limites de carregamento dos tr nsitos nos elementos da rede, foi encontrada uma solu o cujos resultados s o apresentados na Tabela 6.37 a seguir.

Tabela 6.37 - Resultados do Despacho de Seguran a.

GERA�O (MW)				CARGA (MW)			
Barra	Atual	Requerida	Desvio	Barra	Atual	Requerida	Desvio
1	514,30	554,30	40,00				
10	450,00	450,00	0,00				
12	85,00	100,00	15,00				
25	220,00	220,00	0,00				
26	314,00	314,00	0,00				
46	19,00	39,00	20,00				
49	204,00	244,00	40,00				
54	48,00	88,00	40,00				
59	155,00	195,00	15,00				
61	160,00	175,00	-40,00				
65	391,00	351,00	-40,00				
66	392,00	352,00	-40,00				
80	477,00	437,00	-40,00				
89	607,00	567,00	-40,00				
100	252,00	212,00	-40,00				
103	40,00	50,00	10,00				
111	36,00	16,00	-20,00				

Com a manobra sugerida (m_1^*) (Tabela 6.36) e com o Despacho de Seguran a (Tabela 6.37) a sobrecarga foi totalmente eliminada.

Foi realizado um fluxo de carga AC para verificar a parte reativa, e os resultados foram confirmados.

A seguir, na Tabela 6.38, apresentam-se os tempos de cálculo dos resultados, da utilização do Algoritmo de Retirada de Circuitos nos Casos Exemplos, mostrados nas Tabelas 6.34, 6.35 e 6.36, obtidos num computador IBM 4341 do Núcleo de Processamento de Dados da UFSC.

Tabela 6.38 - Tempo de Cálculo.

Caso Exemplo	número de Iterações	* Tempos de Execução (min. seg.)
1	1	3,00
2	6	3,35
3	6	3,29

* Estes tempos incluem entrada e saída de resultados, tempo de complicação, linkagem etc.

6.10 - Análise dos Resultados para os Casos Estudados sobre o Sistema IEEE - 118 Barras

Nos Casos 1 e 2 as manobras m_i^* foram suficientes para eliminar as ultrapassagens do limite operacional dos elementos sobrecarregados.

Em ambos exemplos foi realizado um fluxo de carga AC para verificar a parte reativa.

No Caso 3 a manobra m_i^* sugerida não foi suficiente para eliminar a sobrecarga e por tal razão se recorreu ao DS tentar encontrar uma solução ao caso. O caso resultou tão severo que foi necessário abrir os limites de carregamento dos elementos para poder encontrar uma solução (tal como proposto em [11]).

Observação: O fluxo de potência AC para verificar a parte reativa nos exemplos estudados sobre o Sistema de 118 - Barras IEEE foi: Programa para Estudos de Fluxo de Potência Programa Powermod versão 1.1 implantado no IBM 4341 do NPD da UFSC.

6.11 - Conclusões

Os resultados apresentados neste Capítulo tiveram a finalidade de avaliar o comportamento do Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples - Subprograma 1, aqui desenvolvido.

Foi mostrado através dos Casos Estudados, como o Algoritmo de Retirada de Circuitos - Alterações Simples, que resolve o Problema de Mudança na Topologia da Rede visando o Alívio de Sobrecargas no seu primeiro nível de decomposição, atua no sentido de sugerir qual a melhor manobra m_1^* a ser realizada.

Esta manobra m_1^* pode eliminar totalmente as sobrecargas ou então apenas diminuir o nível destas.

No primeiro caso, a solução do problema é concluída com m_1^* sendo a melhor alternativa de controle sugerida. No segundo caso, m_1^* não é suficiente para resolver o problema e recorre-se ao Despacho de Segurança (DS) do DGTR para buscar a solução.

Se o DS apresenta solução, então a m_1^* seguida de um redespacho (e eventualmente de alívio de carga) é a estratégia alternativa de controle para contornar a situação prevista.

Caso o DS não apresente solução, não há alterna

tiva de controle possível para ultrapassar as dificuldades previstas nesse caso, e então pode-se complementar os estudos com uma tentativa de emergência- envolvendo o exame da situação utilizando a abertura dos limites de trânsito, gradualmente, até os limites de emergência [11].

Os casos estudados, como foi visto, se referem aos Sistemas AEP - 14, obtido da referência [15], com 14 barras e 21 circuitos; ao Sistema Sul (uma configuração provável) obtido junto a Eletrosul com 45 barras e 57 circuitos e ao Sistema Teste da IEEE com 118 barras e 179 circuitos.

C A P Í T U L O 7

RESULTADOS DA UTILIZAÇÃO DO ALGORITMO DE ADIÇÃO DE CIRCUITOS - ALTERAÇÕES SIMPLES E MÚLTIPLAS - SUBPROGRAMA 27.1 - Introdução

Neste Capítulo são apresentados e analisados os resultados da utilização do Algoritmo de Adição de Circuitos - Alterações Simples e Múltiplas - Subprograma 2, aos dois primeiros sistemas elétricos estudados no Capítulo anterior:

- Sistema AEP - 14

- Sistema Sul

Os dados sobre estas duas redes elétricas, incluindo o conjunto de elementos, são objeto dos itens 7.2 e 7.5.

Os resultados da utilização do Algoritmo de Adição de Circuitos no Sistema AEP - 14 e a análise deles são objeto dos itens 7.3 e 7.4.

Nos itens 7.6 e 7.7 são apresentados e analisados resultados para os casos estudados sobre o Sistema Sul.

Finalmente no item 7.8 são apresentadas as principais conclusões deste Capítulo.

7.2 - Sistema AEP - 14 : Dados e Comentários

Neste item serão apresentados os dados necessários para a utilização do Algoritmo de Adição de Circuitos no Sistema AEP - 14, cujo diagrama unifilar é mostrado na Figura 6.1.

Os dados relativos aos parâmetros dos ramos do sistema (resistência série, reatância série, susceptâncias capacitivas bem como os limites de transmissão ou carregamento dos elementos em MVA são apresentados na Tabela 6.1.

- A Tabela 6.2 mostra as condições de operação do sistema para situações definidas de carga obtidas através de um fluxo de carga AC.
- A Tabela 7.1 mostra o conjunto de circuitos chaveáveis bem como os parâmetros dos mesmos, para o caso 1.
- Para o caso 2, a Tabela 7.2, mostra o conjunto de circuitos chaveáveis e os respectivos parâmetros.
- A Tabela 7.3 mostra o conjunto de circuitos chaveáveis e os parâmetros correspondentes para o caso 3.
- Para o caso 4, a Tabela 7.4, mostra o conjunto de circuitos chaveáveis e os parâmetros associados.

Com a finalidade de obter um ponto de operação ba

se para a Análise de Segurança nos diversos Casos a Tabela 6.6 apresenta os resultados da Análise de Contingências, obtidos com auxílio de um fluxo de Carga CC. Cabe observar que neste caso as sobrecargas não puderam ser removidas com um redespacho de geração. Isto é, o DS do DGTR não apresenta solução para esta situação de contingência, para o ponto de operação dado.

Tabela 7.1 - Conjunto de Circuitos Chaveáveis e seus Parâmetros para o Caso 1. Sistema AEP - 14.

Circuito Nº	Da Barra	Para Barra	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância (p.u.)	Capacidade (MVA)
22	13	14	0,17093	0,34802	0,00	16
23	6	13	0,06615	0,13037	0,00	32
24	9	14	0,12711	0,27038	0,00	32
25	10	11	0,08205	0,19207	0,00	16
26	2	3	0,04699	0,19797	0,00	130

Tabela 7.2 - Conjunto de Circuitos Chaveáveis e seus Parâmetros para o Caso 2. Sistema AEP - 14.

Circuito Nº	Da Barra	Para Barra	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância (p.u.)	Capacidade (MVA)
22	4	5	0,01335	0,04211	0,0128	90
23	4	9	0,00	0,55612	0,00	32
24	9	10	0,03181	0,08450	0,00	32
25	6	11	0,09498	0,19890	0,00	32
26	5	6	0,00	0,25202	0,00	65

Tabela 7.3 - Conjunto de Circuito Chaveáveis e seus parâmetros para o Caso 3. Sistema AEP - 14.

Circuito Nº	Da Barra	Para Barra	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância (p.u.)	Capacidade (MVA)
22	4	5	0,01335	0,04211	0,0128	90
23	9	10	0,03181	0,08450	0,00	32
24	2	5	0,05695	0,17388	0,0340	65
25	6	12	0,12291	0,25581	0,00	32
26	12	13	0,22092	0,19988	0,00	16

Tabela 7.4 - Conjunto de Circuitos Chaveáveis e seus parâmetros para o Caso 3. Sistema AEP - 14.

Circuito Nº	Da Barra	Para Barra	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância (p.u.)	Capacidade (MVA)
22	2	3	0,04699	0,19797	0,0492	130
23	3	4	0,06701	0,17103	0,0346	70
24	2	5	0,05695	0,17388	0,0340	65
25	9	10	0,03181	0,08450	0,00	32
26	9	14	0,12711	0,27038	0,00	32

Observação: As resistências, reatâncias e susceptâncias estão expressas considerando-se a base de potência igual a 100 MVA.

7.3 - Resultados da Utilização do Algoritmo da Adição de Circuitos - Alterações Simples e Múltiplas - Subproblema 2 sobre o Sistema AEP - 14

São apresentados na Tabela 7.5, os resultados da utilização do Algoritmo de Adição de Circuitos, no Caso 1 para buscar alternativas de solução ao caso apresentado na Tabela 6.6.

Tabela 7.5 - Resultados Obtidos da Utilização do Algoritmo de Adição de Circuitos - Alterações Simples e Múltiplas. Sistema AEP - 14. Caso 1.

Valor de ZY da rede sobrecarregada antes de alguma manobra: 11, 5200					
MANOBRAS SIMPLES:					
Nº	Circuito Adicionado	Valor de ZY			
1	25	1,8511			
2	24	11,7472			
3	22	6,1456			
4	23	12,3324			
5	26	10,5178			
MANOBRA SIMPLES SUGERIDA:					
Nº	Circuito Adicionado	Valor de ZY	Circuitos Descarregados	Sobrecargas Persistentes	
				Elementos	%
1	25	1,8511	19	21	11,57
			21		

Continua ..

continuação Tabela 7.5

MANOBRAS MÚLTIPLAS:					
Nº	Circuito Adicionado	Valor de ZY	Circuitos Descarregados	Sobrecargas Persistentes	
				Elementos	%
6	22	0,0000	(19)	-	-
	25		(21)	-	-

Neste exemplo (Caso 1) a manobra {m}* (múltipla) por si só permitiu eliminar a sobrecarga e encontrar uma solução para o caso estudado. Os circuitos chaveados estão em paralelo aos circuitos com sobrecarga e tem as mesmas características elétricas. Foi utilizado um fluxo de carga AC para verificar a parte reativa, cujos resultados são apresentados a seguir na Tabela 7.6.

BARRAS									
BARRA	NOME	TENSÃO	ÂNGULO	GERAÇÃO		CARGA		POT. LÍQUIDA	
				MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR
1	A	1.060	.00	159.11	197.38	.00	.00	159.11	197.38
2	B	1.000	-.88	26.00	-144.58	22.80	12.70	3.20	-157.28
3	C	.937	-9.46	.00	.00	98.90	19.00	-98.90	-17.28
4	D	.972	-6.95	.00	.00	50.20	-3.90	-50.20	5.02
5	E	.991	-4.86	.00	.00	8.00	1.60	-8.00	.76
6	F	1.000	-2.68	100.00	27.13	11.80	7.50	88.20	19.63
7	G	.959	-7.79	.00	.00	.00	.00	.00	.00
8	H	.959	-7.79	.00	.00	.00	.00	.00	.00
9	I	.952	-8.24	.00	.00	31.00	16.60	-31.00	.63
10	J	.953	-7.31	.00	.00	9.40	5.80	-9.40	-5.80
11	K	.964	-5.83	.00	.00	3.70	1.80	-3.70	-1.80
12	L	.980	-4.15	.00	.00	6.40	1.60	-6.37	-1.60
13	M	.969	-4.70	.00	.00	14.20	5.80	-14.24	-5.80
14	N	.947	-6.95	.00	.00	15.60	5.00	-15.60	-5.00
				285.11	79.94	272.00	73.50		
FLUXOS									
DA BARRA	PARA A BARRA	MW	MVAR	TAP	PERDA(MW)				
1	2	56.76	87.56	.0000	1.925				
2	1	-54.83	-84.49	.0000	1.925				
1	2	56.76	87.56	.0000	1.925				
2	1	-54.83	-84.49	.0000	1.925				
1	5	45.60	22.26	.0000	1.268				
5	1	-44.33	-19.61	.0000	1.268				
2	3	75.16	18.12	.0000	2.823				
3	2	-72.34	-8.26	.0000	2.823				
2	5	37.70	-6.41	.0000	.826				
5	2	-36.87	7.25	.0000	.826				
3	4	-26.56	-9.41	.0000	.590				
4	3	27.15	8.94	.0000	.590				
4	5	-87.61	-13.62	.0000	1.105				
5	4	88.72	16.50	.0000	1.105				
4	7	6.52	6.16	.9780	.000				
7	4	-6.52	-5.98	.9780	.000				
4	9	3.74	3.54	.9690	.000				
9	4	-3.74	-3.38	.9690	.000				
5	6	-15.51	-3.39	.9650	.000				
6	5	15.51	4.04	.9650	.000				
6	11	29.63	4.74	.0000	.854				
11	6	-28.77	-2.95	.0000	.854				
6	12	11.48	2.29	.0000	.168				
12	6	-11.31	-1.94	.0000	.168				
6	13	31.52	8.57	.0000	.708				
13	6	-30.88	-7.17	.0000	.708				
7	8	.00	.00	.0000	.000				
8	7	.00	.00	.0000	.000				
7	9	6.52	5.98	.0000	.000				
9	7	-6.52	-5.89	.0000	.000				
9	10	-15.30	5.55	.0000	.093				
10	9	15.39	-5.30	.0000	.093				
9	14	-5.44	4.35	.0000	.068				
14	9	5.51	-4.20	.0000	.068				
10	11	-12.40	-.25	.0000	.139				
11	10	12.54	.57	.0000	.139				
12	13	4.94	.34	.0000	.056				
13	12	-4.89	-.29	.0000	.056				
13	14	10.76	.83	.0000	.212				
14	13	-10.55	-.40	.0000	.212				
10	11	-12.40	-.25	.0000	.139				
11	10	12.54	.57	.0000	.139				
13	14	10.76	.83	.0000	.212				
14	13	-10.55	-.40	.0000	.212				
PERDAS 13.113									
ITERAÇÕES 8									

Figura 7.6 - Resultados do Fluxo de Carga AC para o Caso Examinado.

Na adição de circuitos são exploradas as manobras múltiplas só no momento em que alguma das manobras simples for capaz de diminuir as sobrecargas. Caso contrário não, como visto no algoritmo apresentado no Capítulo 5.

Se as sobrecargas persistem ($ZY \geq 10^{-5}$) logo de se terem aplicado as manobras múltiplas $\{m\}^*$, o valor de ZY^* não garante o ótimo, por tal razão, para a manobra simples sugerida m_i^* e para cada manobra múltipla $\{m\}^*$ que contém a manobra simples m_i^* , tem que ser efetuado um Despacho de Segurança que nos dá Z (3.78). A manobra (m_i^* ou $\{m\}^*$) associada ao melhor valor de Z (3.78) é considerada como a melhor manobra entre todas as manobras múltiplas $\{m\}^*$ ou a simples m_i^* .

Nos casos 2, 3 e 4 cujos resultados são apresentados a seguir, isto é utilizado para identificar a melhor manobra (m_i^* ou $\{m\}^*$).

A seguir, a Tabela 7.7, apresenta os resultados obtidos da utilização do Algoritmo de Adição de Circuitos no Caso 2.

Tabela 7.7 - Resultados Obtidos da Utilização do Algoritmo de Adição de Circuitos - Alterações Simples e Múltiplas.

Valor de ZY da rede sobrecarregada antes de alguma manobra: 11, 5200						
MANOBRAS SIMPLES:						
Nº	Circuito Adicionado	Valor de ZY				
1	22	9,0972				
2	26	10,1719				
3	24	11,9646				
4	23	10,5163				
5	25	13,9149				
MANOBRA SIMPLES SUGERIDA:						
Nº	Circuito Adicionado	Valor de ZY	Elementos Descarregados	Sobrecargas Persistentes		Valor de Z (3.78)
				Elementos	%	
1	22	9,0972	19	19	42,36	0,0014
			21	21	14,50	
MANOBRAS MÚLTIPLAS:						
6	22	7,9547	19	19	38,06	Solução Impossível
	23		21	21	11,66	
7	22	9,5705	19	19	47,27	0,0014
	24		21	21	12,55	
8	22	11,4931	21	19	67,21	Solução Impossível
	25			21	4,62	

Continua ...

Continuação Tabela 7.7.

Nº	Circuito Adicionado	Valor de ZY	Elementos Descarregados	Sobrecargas Persistentes		Valor de Z (3.78)
				Elementos	%	
9*	22	4,5742	19	19	25,34	-40,4955
	26		21	21	3,25	
10	22	8,4383	19	19	42,85	Solução Impossível
	23		21	21	9,89	
	24					
11*	22	10,4777	21	19	63,05	-0,0574
	23			21	2,44	
	25					
12*	22	2,9626	19	19	18,52	-0,8931
	23		21	21	0,00	
	26					
13	22	12,2056	21	19	74,61	-0,0013
	24			21	1,68	
	25					
14	22	5,0278	19	19	29,55	Solução Impossível
	24		21	21	1,88	
	26					
15*	22	7,9200	19	19	49,50	-6,4491
	25		21			
	26					
16	22	11,2636	21	19	70,40	-0,0006
	23					
	24					
	25					
17	22	3,5915	19	19	22,45	Solução Impossível
	23		21			
	24					
	26					

Continua ...

Continuação Tabela 7.7.

Nº	Circuito Adicionado	Valor de ZY	Elementos Descarregados	Sobrecargas Persistentes		Valor de Z (3.78)
				Elementos	%	
18*	22	6,8144	19	19	42,59	-1,5048
	23		21			
	25					
	26					
19*	22	8,9385	21	19	56,24	-9,7203
	24					
	25					
	26					
20*	22	7.8583	19	19	49,11	-1,0712
	23		21			
	24					
	25					
	26					

* No DS associado a cada uma dessas manobras foi necessário cortes de carga.

De todas as manobras (m_i^* e $\{m\}^*$), a melhor manobra foi a manobra simples cujo resultados é mostrado na Tabela 7.8.

Tabela 7.8 - Melhor Manobra Sugerida para o Caso Estudado.

Sistema AEP - 14. Caso 2.

Nº	Circuito Adicionado	Valor de ZY	Elementos Descarregados	Sobrecargas Persistentes		Valor de Z (3.78)
				Elementos	%	
1	22	9,0972	19	19	42,36	0,0014
			21	21	14,40	

Com a manobra m_1^* sugerida, foi realizado um Despacho de Segurança para tentar encontrar uma solução ao caso exemplo 2, cujos resultados são mostrados na Tabela 7.9.

Tabela 7.9 - Resultados do Despacho de Segurança para o Caso Estudado. Sistema AEP - 14. Caso 2.

GERAÇÃO (MW)				CARGA (MW)			
Barra	Atual	Requerida	Desvio	Barra	Atual	Requerida	Desvio
1	146,00	200,00	54,00				
2	26,00	10,00	16,00				
6	100,00	62,64	-37,36				

Com a manobra m_1^* sugerida (Tabela 7.8) e o Despacho de segurança (Tabela 7.9) a sobrecarga foi totalmente eliminada. O fluxo de carga AC realizado para verificar a parte reativa, a partir deste momento não tem seus resultados apresentados pelas mesmas razões de conveniência para a compactação do texto. No caso a solução acima se apresenta viável, podendo ser realizada na prática sem problemas sob o ponto de vista da segurança estática.

A Tabela 7.10 a seguir, apresenta os resultados obtidos da utilização do Algoritmo de Adição de Circuitos, no Caso 3.

Tabela 7.10 - Resultados Obtidos da Utilização do Algoritmo de Adição de Circuitos - Alterações Simples e Múltiplas Sistema AEP - 14 Caso 3.

Valor de ZY da rede sobrecarregada antes de alguma manobra: 11, 5200						
MANOBRAS SIMPLES:						
Nº	Circuito Adicionado	Valor de ZY				
1	22	9,0972				
2	23	11,9646				
3	26	11,5177				
4	25	11,6606				
5	24	15,3078				
MANOBRA SIMPLES SUGERIDA:						
Nº	Circuito Adicionado	Valor de ZY	Elementos Descarregados	Sobrecargas Persistentes		Valor de Z (3.78)
				Elementos	%	
1	22	9,0972	19	19	42,36	0,0022
			21	21	14,50	
MANOBRAS MÚLTIPLAS:						
6	22	9,5705	19	19	47,27	0,0017
	23		21	21	12,55	
7	22	9,2445	19	19	42,91	0,0017
	24		21	21	14,86	

Continua ...

Continuação Tabela 7.10

Nº	Circuito Adicionado	Valor de ZY	Elementos Descarregados	Sobrecargas Persistentes		Valor de Z (3.78)	
				Elementos	%		
8	22	9,3052	19	19	41,06	0,0020	
	25		21	21	17,10		
9	22	9,1598	19	19	41,97	0,0020	
	26		21	21	15,28		
10	22	9,7210	19	19	47,86	0,0018	
	23		21	21	12,90		
	24						
11	22	9,7699	19	19	45,90	0,0014	
	23		21	21	15,16		
	25						
12	22	9,6300	19	19	46,86	0,0014	
	23		21	21	13,33		
	26						
13*	22	9,4527	19	19	41,61	0,0058	
	24		21	21	17,47		
	25						
14	22	9,3073	19	19	42,52	Solução Impossível	
	24		21	21	15,65		
	26						
15*	22	9,4522	19	19	40,14	0,0058	
	25		21	21	18,93		
	26						
16	22	9,9206	19	19	46,49	0,0017	
	23		21	21	15,51		
	24						
	25						
17	22	9,7806	19	19	47,45	0,0014	
	23		21	21	13,68		
	24						
	26						

Continua ...

Continuação Tabela 7.10

Nº	Circuito Adicionado	Valor de ZY	Elementos Descarregados	Sobrecargas Persistentes		Valor de Z (3.78)	
				Elementos	%		
18 *	22	9,9101	19	19	44,94	0,0058	
	23		21	21	16,99		
	25						
	26						
19 *	22	9,6001	19	19	40,69	0,0058	
	24		21	21	19,31		
	25						
	26						
20 *	22	10,0611	19	19	45,53	0,0057	
	23		21	21	17,35		
	24						
	25						
	26						

* No DS associado a cada uma dessas manobras foi necessário cortes de carga.

De todas as manobras (m_i^* e $\{m\}^*$), a melhor manobra foi a manobra Múltipla cujo resultado é mostrado na Tabela 7.11.

Tabela 7.11 - Melhor Manobra sugerida para o Caso Estudado.

Sistema AEP - 14 - Caso 3.

Nº	Circuito Adicionado	Valor de ZY	Elementos Descarregados	Sobrecargas Persistentes		Valor de Z (3.78)
				Elementos	%	
7	22	9,2445	19	19	42,91	0.0017
	24		21	21	14,86	

Com a manobra {m}* sugerida, foi realizado um Despacho de Segurança para tentar encontrar uma solução ao Caso 3, cujos resultados são mostrados na Tabela 7.12.

Tabela 7.12 - Resultados do Despacho de Segurança para o Caso Estudado. Sistema AEP - 14.

GERAÇÃO (MW)				CARGA (MW)			
Barra	Atual	Requerida	Desvio	Barra	Atual	Requerida	Desvio
1	146,00	200,00	54,00				
2	26,00	42,46	16,46				
6	100,00	66,22	-33,78				

Com a manobra {m}* sugerida (Tabela 7.11) e o Despacho de Segurança (Tabela 7.12) a sobrecarga foi totalmente eliminada. Esta solução foi verificada usando um fluxo de carga AC que confirmou sua viabilidade.

A seguir, a Tabela 7.13, apresenta os resultados obtidos da utilização do Algoritmo de Adição de Circuitos Caso 4.

Tabela 7.13 - Resultados Obtidos da Utilização do Algoritmo de Adição de Circuitos - Alterações Simples e Múltiplas. Sistema AEP - 14 - Caso 4.

Valor de ZY da rede sobrecarregada antes de alguma manobra: 11, 5200						
MANOBRAS SIMPLES:						
Nº	Circuito Adicionado	Valor de ZY				
1	23	15,7709				
2	25	11,9646				
3	26	11,7472				
4	24	15,3078				
5	22	10,5178				
MANOBRA SIMPLES SUGERIDA:						
Nº	Circuito Adicionado	Valor de ZY	Elementos Descarregados	Sobrecargas Persistentes		Valor de Z (3.78)
				Elementos	%	
5*	22	10,5178	19	19	47,71	0,0058
			21	21	18,03	
MANOBRAS MÚLTIPLAS:						
6*	22	10,6428	19	19	48,18	0,0058
	23		21	21	18,34	
7*	22	10,7493	19	19	48,18	0,0058
	24		21	21	18,61	
8	22	11,0097	21	19	52,88	Solução <u>Im</u> possível
	25			21	15,93	

Continua ...

Continuação Tabela 7.13

Nº	Circuito	Valor de ZY	Elementos Descarregados	Sobrecargas Persistentes		Valor de Z (3.78)
				Elementos	%	
9 *	22	10,7817	19	19	46,00	-0,0058
	26			21	21,39	
10 *	22	10,9593	19	19	49,57	0,0058
	23			21	19,13	
	24					
11	22	11,1380	21	19	53,39	Solução Impos-sível
	23			21	16,23	
	25					
12 *	22	10,9110	19	19	46,44	0,0058
	23			21	21,75	
	26					
13 *	22	11,2463	21	19	53,81	-0,4581
	24			21	16,48	
	25					
14 *	22	11,0207	19	19	46,82	0,0058
	24			21	22,06	
	26					
15 *	22	11,2385	19	19	51,16	-0,2620
	25			21	18,98	
	26					
16 *	22	11,4615	21	19	54,65	-0,6440
	23			21	16,99	
	24					
	25					
17 *	22	11,2379	19	19	47,57	0,0058
	23			21	22,67	
	24					
	26					

Continua ...

Continuação Tabela 7.13

Nº	Circuito Adicionado	Valor de ZY	Elementos Descarregados	Sobrecargas Persistentes		Valor de Z (3.78)
				Elementos	%	
18*	22	11,3709	21	19	51,73	-0,1524
	23			21	19,33	
	25					
	26					
19*	22	11,4821	21	19	52,13	-1,0635
	24			21	19,63	
	25					
	26					
20*	22	11,7041	21	19	52,93	-1,1897
	23			21	20,22	
	24					
	25					
	26					

* No DS associado a cada uma dessas manobras foi necessário cortes de carga.

De todas as manobras (m_i^* e $\{m\}^*$), a melhor manobra foi a manobra simples cujo resultado é mostrado na Tabela 7.14.

Tabela 7.14 - Melhor Manobra Sugerida para o Caso Estudado.

Sistema AEP - 14 Caso 4.

Nº	Circuito Adicionado	Valor de ZY	Elementos Descarregados	Sobrecargas Persistentes		Valor de Z (3.78)
				Elementos	%	
5	22	10,5178	19	19	47,71	0,0058
			21	21	18,03	

Com a manobra m_1^* sugerida, foi realizado um Despacho de Segurança para tentar encontrar uma solução ao Caso 4, cujos resultados são mostrados na Tabela 7.15.

Tabela 7.15 - Resultados do Despacho de Segurança para o Caso Estudado.

GERAÇÃO (MW)				CARGA (MW)			
Barra	Atual	Requerida	Desvio	Barra	Atual	Requerida	Desvio
1	146,00	185,18	39,18				
2	26,00	26,00	0,00				
6	100,00	60,58	-39,42				
				14	15,60	15,09	-0,51

Com a manobra m_1^* sugerida (Tabela 7.14) e o Despacho de Segurança (Tabela 7.15) a sobrecarga foi totalmente eliminada.

Nota-se que neste caso a solução é possível se o alívio da carga na barra 14 for realizado. Note-se que este alívio de carga é bastante leve, da ordem de

$$\frac{0,51}{15,60} \times 100 \approx \frac{51}{15,6} \approx 3,3\% \text{ da carga da barra 14.}$$

Esta solução passa pelo teste de verificação usando o fluxo de Carga AC como nos casos anteriores.

Observação: O fluxo de potência AC utilizado para a verificação das soluções no Sistema AEP - 14 foi um fluxo de potência AC desacoplado rápido.

A seguir, na Tabela 7.15, apresentam-se os tempos de cálculo dos resultados, da utilização do Algoritmo Adição de Circuitos nos Casos 1, 2, 3 e 4, apresentados nas tabelas 7.5, 7.7, 7.10 e 7.13, respectivamente, obtidos sobre um microcomputador I-7000 PCxt da Itautec do Laboratório de Sistemas de Potência (LABSPOT) do Centro Tecnológico (CTC) da UFSC.

Tabela 7.15 - Tempos de Cálculo.

Caso Exemplos Nº	Número de Iterações	*Tempo de Cálculo ** (seg.)
1	6	4,39
2	20	27,74
3	20	28,02
4	20	28,01

* Num IBM 4341 são de 10 a 15 vezes menores.

** Num VAX/780 são de 5 a 8 vezes menores.

7.4 - Análise dos Resultados para os Casos Estudados sobre o Sistema AEP-14

Foram apresentados quatro casos. A contingência analisa foi a mesma em cada um deles. A sobrecarga resultante desta contingência não apresentou solução logo após se ter aplicado a função DS do DGTR e por tal razão foram aplicadas ações de controle via manobras na rede para tentar encontrar uma solução ao caso estudado.

No caso 1, a manobra sugerida, por si só permitiu eliminar a sobrecarga e encontrar uma solução ao Caso Estudado.

A parte reativa foi verificada com a utilização de um fluxo de carga AC.

Nos casos 2, 3 e 4, as manobras sugeridas não foram suficientes para eliminar a sobrecarga e encontrar uma solução para o caso. Foi necessário realizar um DS para eliminar a sobrecarga. Um fluxo de carga AC novamente foi utilizado para verificar a parte reativa.

7.5 - Sistema Sul: Dados e Comentários

Neste item são apresentados os dados necessários para a utilização do Algoritmo de Adição de Circuitos no Sistema Sul cujo diagrama unifilar é mostrado na Figura 6.2.

Os dados relativos aos parâmetros dos ramos do sistema (resistência série, reatância série, susceptância capacitivas) bem como os limites de transmissão ou carregamento dos elementos em MVA são apresentados os mesmos que serviram de base para os estudos do Capítulo 6.

As condições de operação do sistema para situações definidas de carga obtidas através de um fluxo carga AC, são idênticas àquelas obtidas no Capítulo anterior.

A Tabela 7.16 mostra o conjunto de circuitos chaveáveis bem como os parâmetros dos mesmos, para o Caso 1.

Para o Caso 2, a Tabela 7.17 mostra o conjunto de circuitos chaveáveis e seus respectivos parâmetros.

Com a finalidade de obter um ponto de operação base para a Análise de Segurança nos Casos, as Tabelas 6.21 e 6.22 apresentam os resultados da Análise de Contingências, obtidos com auxílio de um fluxo de carga CC. Nestes casos as sobrecargas não puderam ser removidas com um Redespacho de Geração como visto.

Tabela 7.16 - Conjunto de Circuitos Chaveáveis e seus Parâmetros para o Caso 1. Sistema Sul.

Circuito Nº	Da Barra	Para Barra	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância (p.u.)	Capacidade (MVA)
58	370	408	2,5000	15,4800	0,4690	270,00
59	399	408	2,5000	15,4800	0,4690	270,00
60	371	399	0,8850	4,5500	0,3170	350,00

Tabela 7.17 - Conjunto de Circuitos Chaveáveis e seus Parâmetros para o Caso 2. Sistema Sul.

Circuito Nº	Da Barra	Para Barra	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância (p.u.)	Capacidade (MVA)
58	368	408	2,3150	11,8900	0,8168	270,00
59	371	399	0,8850	4,5500	0,3170	270,00
60	370	399	2,5000	15,4800	0,4690	270,00

Observação: As resistências, reatâncias e susceptâncias estão expressas considerando-se a base de potência igual a 100 MVA

7.6 - Resultados da Utilização do Algoritmo de Adição de Circuitos - Alterações Simples e Múltiplas - Subprograma 2 sobre o Sistema

Na Tabela 7.18 são apresentados os resultados da utilização do Algoritmo de Adição de Circuitos, no Caso Exemplo 1 para buscar alternativas de solução ao caso apresentado na Tabela 6.21.

Tabela 7.18 - Resultados Obtidos da Utilização do Algoritmo de Adição de Circuitos - Alterações Simples e Múltiplas Sistema Sul. Caso 1.

Valor de ZY da rede sobrecarregada antes de alguma manobra: 43,2358					
MANOBRAS SIMPLES:					
Nº	Circuito Adicionado	Valor de ZY			
1	58	26,0371			
2	59	2,9755			
3	60	17,7202			
MANOBRA SIMPLES SUGERIDA:					
Nº	Circuito Adicionado	Valor de ZY	Circuito Descarregados	Sobrecargas Persistentes	
				Elementos	%
2	59	2,9755	9	51	0,54

Continua ...

Continuação Tabela 7.18

MANOBRAS MÚLTIPLAS:					
Nº	Circuito Adicionado	Valor de ZY	Circuito Descarregados	Sobrecargas Persistentes	
				Elementos	%
4	58	2,9649	9	51	0,53
	59				
5	59	0,0000	9	-	-
	60				

Neste exemplo (Caso 1) a manobra {m}* (múltipla) por si só permitiu eliminar a sobrecarga e encontrar uma solução para o caso estudado. Foi utilizado um fluxo de carga AC para verificar a parte reativa, confirmando a viabilidade desta solução.

A seguir, a Tabela 7.19 apresenta os resultados obtidos pela utilização do Algoritmo de Adição de Circuitos, a Caso 2, para buscar alternativas de solução ao caso apresenta do na Tabela 6.22.

Tabela 7.19 - Resultados Obtidos da Utilização do Algoritmo de Adição de Circuitos - Alterações Simples e Múltiplas. Sistema Sul. Caso 2.

Valor de ZY da rede sobrecarregada antes de alguma manobra: 19,67					
MANOBRAS SIMPLES:					
nº	Circuito Adicionado	Valor de ZY			
1	58	38,1673			
2	60	0,0000			
MANOBRA SIMPLES SUGERIDA:					
nº	Circuito Dentro	Valor de ZY	Elementos Descarregados	Sobrecargas Persistentes	
				Elementos	%
2	60	0,0000	9	-	-

Neste caso (caso 2) a manobra m_1^* (simples) por si só permitiu eliminar a sobrecarga e encontrar uma solução para o caso estudado. Foi utilizado como sempre um fluxo de carga AC para verificar a parte reativa e testar a viabilidade da solução acima proposta.

Observação: O fluxo de potência AC utilizado para os casos examinados no Sistema Sul foi o Programa para estudos de Fluxo de Potência "Powermdo", versão 1.1, implantado no IBM 4341 do Núcleo de Processamento de Dados (NPD) da UFSC.

A seguir, na Tabela 7.26, são apresentados os tempos de cálculo resultantes, da utilização de Algoritmo de Adição de Circuitos nos casos 1 e 2, apresentados na Tabela 7.18 e 7.19 respectivamente, obtidos sobre um microcomputador I-7000 PCxt da Itautec do Laboratório de Sistemas de Potência (LABSPOT) do Centro Tecnológico (CTC) da UFSC.

Tabela 7.20 - Tempos de Cálculo.

Caso Exemplos Nº	Número de Iterações	* Tempo de Cálculo ** (Seg)
1	5	5,99
2	2	5,49

* Num IBM 4341 são de 10 a 15 vezes menores.

** Num VAX/780 são de 5 a 8 vezes menores.

7.7 - Análise dos Resultados para os Casos Estudados sobre o Sistema Sul

Nos casos 1 e 2 examinados sobre o Sistema Sul as manobras sugeridas, por si só, permitiram eliminar as sobrecargas e encontrar uma solução ao caso estudado, não tendo sido necessário recorrer ao DS.

A parte reativa foi verificada com a utilização

propostas pelo algoritmo, sob o ponto de vista do regime permanente (estático).

7.8 - Conclusões

Os resultados apresentados neste Capítulo tiveram a finalidade de avaliar o comportamento do Algoritmo de Adição de Circuitos - Alterações Simples e Múltiplas - Subprograma 2, desenvolvido neste trabalho.

Através dos casos estudados sobre o Sistema AEP-14 e Sistema Sul, foi mostrado como o Algoritmo de Adição de Circuitos - Alterações Simples e Múltiplas, que resolve o Problema de Mudança na Topologia da Rede, visando o Alívio de sobrecargas, no seu primeiro nível de decomposição, atua no sentido de sugerir qual a melhor manobra m_1^* (simples ou $\{m\}^*$ (múltipla) a ser realizada.

Esta manobra m_1^* (simples) ou $\{m\}^*$ (múltipla) pode eliminar totalmente as sobrecargas ou então apenas diminuir o nível destas.

A solução do problema, no primeiro caso, é concluído com m_1^* (manobra simples) ou $\{m\}^*$ manobra múltipla) sendo a melhor alternativa de controle sugerida. No segundo caso, se m_1^* (manobra simples) ou $\{m\}^*$ (manobras múltiplas) não são suficientes para resolver o problema, então recorre-se ao Despacho de Segurança do DGTR para buscar uma solução.

Se o Despacho de Segurança apresenta solução então a m_1^* ou $\{m\}^*$ sugerida, seguida de um redespacho (e eventualmente de um corte de carga) é a estratégia alternativa de controle para contornar a situação prevista. Se o DS não apre

senda solução, não há alternativa de controle possível para con
tornar o problema e ultrapassar as dificuldades previstas, e
nesta situação pode-se complementar os estudos com uma tentati
va de solução, envolvendo o exame da situação que resulta a uti
zação da abertura gradual dos limites de trânsito até os limi
tes de emergência [11].

C A P Í T U L O 8

CONCLUSÕES8.1 - Conclusões Finais

- Os resultados obtidos, utilizando o algoritmo desenvolvido adotando a filosofia proposta, mostraram-se bastante satisfatórios no que respeita à qualidade e com relação aos tempos de cálculo.

- A decomposição adotada com base nesta filosofia é responsável por economias de tempo de computação, mas também pela coerência entre as soluções encontradas e os procedimentos correntes da operação. Além disso, esta decomposição revela, para os estudos realizados, uma grande eficiência e segurança na busca das soluções, com os resultados concordando com o de outros procedimentos examinados.

- Os testes de verificação final, através do fluxo de carga CA, mostraram que soluções encontradas por outros algoritmos não são, em geral, viáveis. Isto se deve, principalmente, ao fato de não estar sendo levado em conta restrições operacionais de enorme importância à nível do Despacho de Segurança.

- A manutenção do teste do fluxo de carga CA no caso do algoritmo construído no contexto deste trabalho, tem como finalidade apenas a verificação do comprometimento das soluções com relação as linearizações feitas.

- O uso de uma técnica do tipo de Separação e Avaliação Progressiva tal como proposto neste trabalho, para resolver o problema da decomposição, no primeiro nível formulado como um Problema de Programação Linear Inteira do tipo zero-um, simplifica muito as operações sobre o computador, a melhor manobra (subconjunto de manobras) em tempos compatíveis com a Análise de Segurança em Tempo Real.

- A recorrência ao DGTR [8] para solução do Despacho de Segurança (DS) sendo determinada somente para a melhor manobra (ou conjunto de manobras) escolhida (s) no primeiro nível, evita perda de tempo computacional com o exame de manobras (ou conjunto de manobras) ineficientes para a solução do problema.

- O critério adotado de evitar o recurso ao DGTR se a manobra for suficiente para eliminar completamente as sobrecargas, o que ocorre em muitos casos, é outro fator determinante de economia computacional.

- Os efeitos de manobras de retirada e adição puderam ser apreciados, podendo-se ressaltar o seguinte:

- Os elementos candidatos à retirada em princípio seriam todos os elementos da rede, mais certamente muitas destas retiradas são ineficientes para o alívio de sobrecargas. O conjunto de elementos chaveáveis, nesse caso, deveria incluir somente elementos que contribuam apreciavelmente para este alívio.

- Os elementos candidatos à adição, entretanto,

são em número bem definidos e limitados, mas nesse caso a possibilidade de manobras múltiplas conduz a um problema combinatório, aumentando os tempos de cálculo.

8.2 - Sugestões para Futuros Trabalhos

Algumas sugestões para futuros trabalhos podem ser feitas:

1 - Fazer modificações nos algoritmos para lograr ainda menores tempos de cálculo, através de uma compactação como a usada por Gorenstin [15], e mudar a filosofia de tal forma a considerar as manobras na rede, na saída da Análise de Contingências dentro da Análise de Segurança em Tempo Real.

2 - Fazer estudos exaustivos sobre os efeitos de retirada ou adição de circuitos na rede elétrica de modo a encontrar uma possível regra heurística para ordenar as manobras segundo critérios de eficiência no alívio das sobrecargas como sugere o Apêndice B.

3 - Incluir nos algoritmos desenvolvidos neste trabalho estudos sobre manobras que levem em conta o desdobramento ou condensação de nós.

4 - Incluir facilidades no sentido de permitir a verificação da solução obtida em termos da estabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] - HADLEY, J. - "Programação Linear". Editora Guanabara Dois. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1982.
- [02] - MACULAN, N. - "Programação Linear Inteira". Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia - UFRJ-RJ, Brasil, 1978.
- [03] - SALKIN, M., HARVEY. - "Integer Programming", Addison - Wesley Publishing Company, 1975.
- [04] - HIELLER, A. FREDERICK; LIEBERMAN, J. GERALD. - "Operations Research". Second Edition Holday-Day Inc. 1974 San Francisco, California, USA.
- [05] - WAGNER H. M. - "Principles of Operational Research". Prentice/Hall International, Inc. 1969.
- [06] - MONTICELLI, A. J. - "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica". Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo, Brasil, 1983.
- [07] - WOOD, A. J.; WOLLEMBERG, F. F. - "Power Generation, Operation and Control". John Wiley and Sons. 1984.
- [08] - GUELFY, AGUILAR, A. H. - "Despacho de Geração para o Controle em Tempo Real dos Sistemas de Potência". Tese de M.Sc. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 1986.

- [09] - GUIMARÃES, G. C. - "Despacho de Geração em Tempo Real dos Sistemas Elétricos de Potência". Dissertação de Mestrado, UFSC, EEL, Florianópolis, Santa Catarina, Agosto, 1984.
- [10] - MACHADO, L. J. B.; GUELFÍ, AGUILAR, A. H. - "Despacho de Geração para o Controle de Tempo Real de Sistemas de Potência", Anais do 2º Congresso Latinoamericano de Control Automático, Buenos Aires, Argentina, 1986, Vol. 2, pág. 437 a pág. 442.
- [11] - MACHADO, L. J. B.; GUELFÍ, AGUILAR, A. H. - "Análise de Alternativas de Controle Corretivo através do Despacho de Geração em Tempo Real para Sistemas Elétricos de Potência", Anais de 6º Congresso Brasileiro de Automática, Belo Horizonte, Brasil, 1986, Vol. 2, pág. 757 a pág. 762.
- [12] - MAZI, A. A.; WOLLEMBERG, B. F.; HESSE, M. H.; - "Corrective Control of Power System Flows by Line and Bus - Bar Switching". IEEE Transaction on Power Systems, Vol. PWS - 1 Nº 3, August 1986, pp 258 - 265.
- [13] - BACHER, R.; GLAVITSCH, H. - "Network Topology Optimization with Security Constraints". IEEE Transaction on Power Systems, Vol. PWS - 1 nº 4, November 1986, pp 103 - 111.

- [14] - DODU, J.; MERLIN, A.; DAVID, J. M. - "On the Research of Optimal Switching Configurations in Power Transmission System Studies". Proc. 7 th PSCC, Lausanne, 1981.
- [15] - GORENSTIN, B. G. - "Chaveamento de Circuitos para Alívio de Sobrecargas". Tese de M. Sc. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1985.
- [16] - KOGLIN, H.; MÜELLER, H. - "Overload Reduction through Corrective Switching Actions". In IEE Conf. Publication nº 187, London, 1980.
- [17] - KOGLIN, H.; MEDEIROS, M. - "Corrective Switching Approaching in on Line Application". In Proc. CIGRE/IFAC Symposium, Rio de Janeiro, 1985.
- [18] - MONTICELLI, A.; PEREIRA, M. V. F.; GRANVILLE, A. - "Security - Constrained Optimal Power Flow with Post-Contingency Corrective Rescheduling". IEEE Transaction on Power Systems, Vol. PWRS - 2, nº 1 February 1987, pp 175 - 180.
- [19] - SHARIFNIA, A.; AASTIANI, H. - "Transmission Network Planning: A Method of Minimum Cost Secure Network". IEEE Trans. Power App. Syst. Vol. PAS - 104, nº 8, August, 1985.

- [20] - STOTT, B.; MARINHO, J. L. - "Linear Programming for Power System Security Applications". IEEE Trans. Power App. 8 Sept. May/June, 1978.
- [21] - AMERONGEN VAN R. A. M. ; MEETERÉN VAN H.P. - "Security Control by Real Power Rescheduling Network Switching and Load Shedding. CIGRE Report n° 32 - 02, August 27, September 4, 1980.

A P Ê N D I C E A

FORMULAÇÃO DO MODELO DA REDE ELÉTRICA
UTILIZADA NESTE TRABALHO

Em uma rede elétrica o fluxo de potência ativa em uma linha de transmissão é aproximadamente proporcional à abertura angular na linha e se desloca no sentido dos ângulos maiores para os ângulos menores. (Monticelli [6]).

A relação entre os fluxos de potência ativa e as aberturas angulares é do mesmo tipo da existente entre os fluxos de corrente e as quedas de tensão em um circuito de corrente contínua, para a qual é válida a Lei de Ohm. Esta propriedade possibilita o desenvolvimento de um modelo aproximado, chamado de "Modelo CC" ou "Fluxo de Carga CC" [6], que permite estimar, com baixo custo computacional e precisão aceitável para muitas aplicações, a distribuição dos fluxos de potência ativa em uma rede de transmissão.

O "Fluxo de Carga CC" é baseado no forte acoplamento entre as variáveis P (potências ativas) e θ (defasamentos angulares das tensões), e no fraco acoplamento entre as variáveis P (potências ativas) e V (magnitude das tensões).

Este modelo apresenta resultados melhores quanto mais elevado o nível de tensão.

A.1 - Equações da Rede:

A injeção de corrente I_i na barra i vem expressa por [6]:

$$I_i = \sum_{m \in \Omega_i} Y_{im} \underline{E}_m \quad (\text{A.1}),$$

onde:

m - número de barras adjacentes a barra i ;

Ω_i - conjunto das barras vizinhas a barra i incluindo a própria barra i ;

E_m - tensão terminal na barra m e

Y_{im} - elemento da matriz admitância nodal Y .

Considerando-se que:

$$Y_{im} = G_{im} + j B_{im} \quad (\text{A.2})$$

e

$$E_m = V_m e^{j \theta_m} \quad (\text{A.3}),$$

onde:

G_{im} - condutância;

B_{im} - susceptância e

V_m - modulo da tensão terminal na barra m .

A expressão (A.1) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$I_i = \sum_{m \in \Omega_i} (G_{im} + j B_{im}) (V_m e^{j \theta_m}) \quad (\text{A.4})$$

A injeção de potência complexa na barra i é:

$$S_i^* = P_i - j Q_i = E_i^* I_i \quad (\text{A.5})$$

Substituindo (A.4) em (A.5) e considerando-se que

$$E_i^* = V_i e^{-j \theta_i} \quad (\text{A.6})$$

onde:

V_i - módulo da tensão terminal na barra i ,

obtêm-se:

$$S_i^* = (V_i e^{-j \theta_i}) \left[\sum_{m \in \Omega_i} (G_{im} + j B_{im}) (V_m e^{j \theta_m}) \right] \quad (\text{A.7})$$

ou

$$S_i^* = [V_i (\cos \theta_i - j \sen \theta_i)] \left\{ \sum_{m \in \Omega_i} [G_{im} + j B_{im}] - [V_m (\cos \theta_m + j \sen \theta_m)] \right\} \quad (\text{A.8})$$

Desenvolvendo a expressão (A.8) e identificando-se a parte real e imaginária tem-se:

$$P_i - j Q_i = (V_i) \left[\sum_{m \in \Omega_i} V_m (G_{im} \cos \theta_{im} + B_{im} \sen \theta_{im}) \right] - j (V_i) \left[\sum_{m \in \Omega_i} V_m (G_{im} \sen \theta_{im} - B_{im} \cos \theta_{im}) \right] \quad (\text{A.9})$$

Certas hipóteses devem ser lançadas para que a equação (A.9) possa ser linearizada. Estas hipóteses são:

- Não se considera a potência reativa.
- Os módulos das tensões nodais podem ser assumidas iguais a unidade ($V_i, V_m \cong 1,0$ p.u. - $i, m = 1, \dots, NB$).
- As aberturas angulares são pequenas nos ramos do sistema.

Isto é:

$$\cos \theta_{im} \cong 1,0 \quad e$$

$$\sin \theta_{im} \cong \theta_{im}$$

- As resistências das linhas podem ser ignoradas ($x_{im} \gg r_{im}$); de maneira que as perdas do sistema são desprezadas.
- As susceptâncias "Shunt" da rede de transmissão são ignoradas.

A equação (A.9) é então simplificada e pode tomar a seguinte forma:

$$P_i = \sum_{m \in \Omega_i} B_{im} \theta_{im} \quad (A.10),$$

ou na forma matricial,

$$\underline{P} = B \underline{\theta} \quad (\text{A.11}),$$

onde:

\underline{P} - vetor das injeções líquidas de potência ativa,

$\underline{\theta}$ - vetor dos ângulos das tensões nodais e

B - matriz tipo admitância nodal, cujos elementos são:

$$B_{im} = -x_{im}^{-1},$$

$$B_{ii} = \sum_{m \in \Omega_i} x_{im}^{-1},$$

onde: x_{im} - reatância série do ramo (i - m).

A matriz B da equação (A.11) é singular, pois, como as perdas de transmissão foram desprezadas, a soma dos componentes de \underline{P} é nula. Ou seja, a injeção de potência em uma barra qualquer pode ser obtida a partir da soma algébrica dos demais, significando uma dependência linear. Para resolver este problema, elimina-se uma das equações do sistema de equações de (A.11) e adota-se a barra correspondente como referência angular ($\theta_{ref} = 0$).

A formação da matriz B (tipo admitância nodal), pode ser feita com auxílio da seguinte expressão [8]:

$$B = A^t \gamma A \quad (\text{A.12}),$$

onde:

A - matriz de incidência dos ramos nos nós da rede, ex
cluindo o nó de referência (dimensão NL x (NB-1));

Y - matriz diagonal cujos elementos são as susceptâncias
primitivas dos ramos (dimensão NL x NL),

NB - número de barras da rede e

NL - número de ramos da rede.

A.2 - Equações dos Trânsitos de Potência Ativa nos Ramos da Rede

Os fluxos de potência ativa P_{im} nos ramos de re
de são dados pelas seguintes expressões, (Monticelli [6]):

$$P_{im} = V_i^2 g_{im} - V_i V_m g_{im} \cos \theta_{im} - \\ - V_i V_m \text{sen } \theta_{im} \quad (\text{A.13}),$$

$$P_{mi} = V_m^2 g_{im} - V_i V_m g_{im} \cos \theta_{im} + V_i V_m b_{im} \text{sen } \theta_{im} \quad (\text{A.14}),$$

sendo que:

$$g_{im} = \frac{r_{im}}{r_{im}^2 + x_{im}^2} \quad (\text{A.15})$$

e

$$b_{im} = \frac{-x_{im}}{r_{im}^2 + x_{im}^2} \quad (\text{A.16}),$$

onde:

g_{im} - condutância série do ramo (i - m);

b_{im} - susceptância série do ramo (i - m);

r_{im} - resistência série do ramo (i - m);

x_{im} - reatância série do ramo (i - m).

Considerando as mesmas hipóteses como válidas e com as aproximações referidas anteriormente, pode-se chegar à seguinte expressão:

$$P_{im} = x_{im}^{-1} \theta_{im} \quad (\text{A.17}),$$

sendo que

$$P_{im} = - P_{mi} \quad (\text{A.18})$$

Colocando a equação (A.17) na forma matricial tem-se:

$$\underline{T} = \gamma \underline{\Phi} \quad (\text{A.19}),$$

onde:

\underline{T} - vetor dos trânsitos de potência ativa nos ramos;

$\underline{\Phi}$ - vetor das aberturas angulares dos ramos da rede;

γ - matriz diagonal cujos elementos são as susceptâncias

primitivas dos ramos (dimensão NL x NL) e

NL - número de ramos da rede.

As aberturas angulares podem ser definidas a partir dos ângulos das tensões nodais com auxílio da matriz de incidência A. Isto é:

$$\underline{\Phi} = A \underline{\theta} \quad (\text{A.20})$$

e então resulta que:

$$\underline{T} = \gamma A \underline{\theta} \quad (\text{A.21})$$

Da equação (A.12) obtém-se:

$$\underline{\theta} = B^{-1} \underline{P} \quad (\text{A.22})$$

e portanto:

$$\underline{T} = \gamma A B^{-1} \underline{P} \quad (\text{A.23}),$$

obtendo-se assim, a equação linearizada dos trânsitos de potência ativa nos ramos da rede como sendo:

$$\underline{T} = S \underline{P} \quad (\text{A.24}),$$

sendo que:

$$S = \gamma A B^{-1} \quad (\text{A.25}),$$

onde:

S - matriz que relaciona as injeções de potência ativa nos nós com os trânsitos de potência ativa nos ramos (dimensão $NL \times (NB - 1)$);

NL - número de ramos da rede e

NB - número de barras da rede.

A P Ê N D I C E B

ALGUMAS CONSIDERAÇÕES À RESPEITO DA RETIRADA
DE ELEMENTOS, ALTERAÇÕES SIMPLES
PARA ALÍVIO DE SOBRECARGAS

Examinando os resultados dos estudos realizados usando o algoritmo descrito no Capítulo 5, se verifica para todos os casos, sobre os sistemas estudados, que os elementos, do conjunto de circuitos chaveáveis $\{L\}$, que mais diminuem os níveis de sobrecargas, se encontram em algum laço fechado sobre os circuitos sobrecarregados.

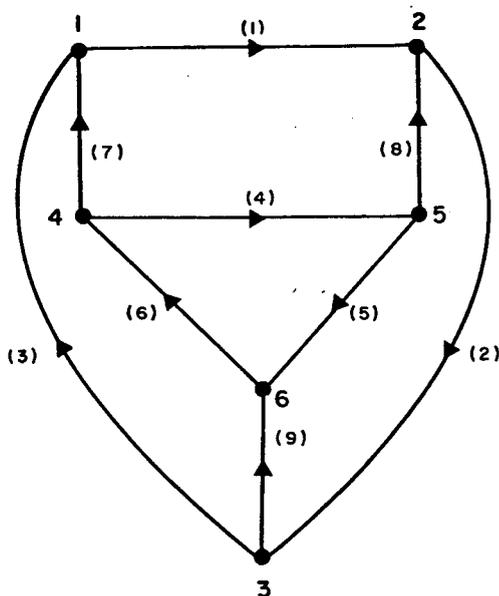


Figura B.1 - Rede Elétrica representada por seu Grafo G orientado.

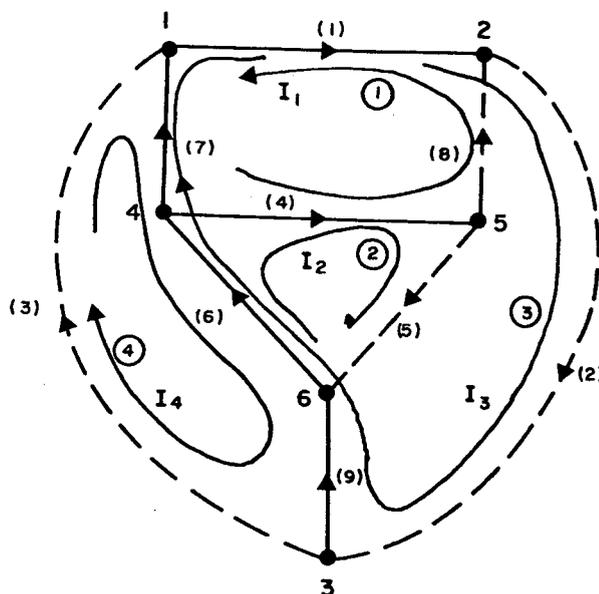


Figura B.2 - Árvore Escolhida para o Grafo G da Figura B.1.

Na Figura B.2 o conjunto de elementos da árvore é:

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

e o conjunto de elementos da co-árvore é:

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

Onde:

M é o conjunto dos ramos do grafo G definidos pela árvore escolhida;

L é o conjunto dos ligações do grafo G que pertencem à co-árvore associada à árvore M escolhida acima.

A cada ligação corresponde um laço fundamental que é definido sobre a árvore correspondente, como mostra a Figura B.2.

A relação entre as correntes nos ramos da árvore M e as correntes nas ligações L, ou nos laços associados, é a seguinte:

$$\bar{I}_{\text{LAÇO}} = [S] \cdot \bar{I}_{\text{RAMO}} \quad (\text{B.1})$$

onde:

	J ₁	J ₂	J ₃	J ₄	J ₅	J ₆	J ₇	J ₈	J ₉	
I ₁	-1	0	0	1	0	0	-1	1	0	= [S] (B.2)
I ₂	0	0	0	1	1	1	0	0	0	
I ₃	1	1	0	0	0	1	1	0	1	
I ₄	0	0	1	0	0	-1	-1	0	-1	

É possível escrever as correntes de ramo \bar{I}_{RAMO} em função das correntes de LAÇO como segue:

$$J_1 = -I_1 + I_3 \quad (\text{B.3})$$

$$J_2 = I_3 \quad (\text{B.4})$$

$$J_3 = I_4 \quad (\text{B.5})$$

$$J_4 = I_1 + I_2 \quad (\text{B.6})$$

$$J_5 = I_2 \quad (\text{B.7})$$

$$J_6 = I_2 + I_3 - I_4 \quad (\text{B.8})$$

$$J_7 = -I_1 + I_3 - I_4 \quad (\text{B.9})$$

$$J_8 = I_1 \quad (\text{B.10})$$

$$J_9 = I_3 - I_4 \quad (\text{B.11})$$

Agora, como as correntes nos ramos J_1 , J_7 , J_6 , J_4 , J_9 podem ser reescritas em função das correntes nas ligações J_2 , J_3 , J_5 e J_8 , tem-se:

$$J_1 = -J_8 + J_2 \quad (\text{B.12})$$

$$J_7 = -J_8 + J_2 - J_3 \quad (\text{B.13})$$

$$J_6 = J_5 + J_2 - J_3 \quad (\text{B.14})$$

$$J_4 = J_8 + J_5 \quad (\text{B.15})$$

$$J_9 = J_2 - J_3 \quad (\text{B.16})$$

Estas últimas expressões mostram como as correntes nos ramos se relacionam com as correntes nas ligações.

Supondo agora que o conjunto de elementos chaveáveis da rede do exemplo seja constituído exactamente de todas as

ligações L :

$$\{L\} = \text{Conjunto de elementos chaveáveis} = \{(2), (3), (5), (8)\}$$

pode-se imaginar o que acontece com as correntes nos ramos se eliminarmos cada uma destas ligações.

Ligação (2):

A retirada desta ligação tem as seguintes expressões:

$$J_1 = - J_8$$

$$J_7 = - J_8 - J_3 \quad (\text{B.17})$$

$$J_6 = J_5 - J_3$$

$$J_9 = - J_3$$

mas não afeta a corrente no ramo J_4 , que se estiver sobrecarregado terá sua situação insensível a esta manobra.

Fica claro que para alterar J_4 é preciso contar com manobras de retirada tais como as da ligação (8) e (5).

É preciso notar ainda que a eliminação de uma ligação, tal como (8) ou (5) no exemplo, não garante que, estando o ramo (4) sobrecarregado, ter-se-á garantidamente um alívio da sobrecarga.

Para mostrar o contrário, basta admitir que a manobra retirada da ligação (5) é decidida. Se por acaso $J_4 > J_{4\text{máx}}$, $J_8 > \phi$ e $J_5 = (-a) < 0$, então se terá:

$J_4 = J_8 + (-a) > J_{4m\acute{a}x}$ antes da retirada, e depois:

$J_4 = J_8 \gg J_{4m\acute{a}x}$ evidentemente. Isto é, nesse caso a sobrecarga aumentará.

Isto pode conduzir a um critério para a seleção da manobra a executar que seria o seguinte:

1º) Escolha uma árvore que exclua todos os elementos do conjunto de elementos candidatos à retirada, que contenha o elemento (ou os elementos sobrecarregados).

2º) Escreva as equações do tipo das (B.12) a (B.16) generalizadas.

3º) Identifique os elementos de L que pertencem ao maior número destas equações.

4º) Anule seu valor e calcule os novos valores J_i correspondentes aos ramos sobrecarregados (i).

Se $J_i^* \geq J_i$, para todo i , tal que

i = índice dos elementos sobrecarregados, a manobra correspondente é eliminada por não trazer qualquer benefício para o objetivo de alívio das sobrecargas.

Se $J_i^* < J_i$, para todo i , tal que

i = índice dos elementos sobrecarregados a manobra $(m_k) \in L$ é candidata, sendo colocada no conjunto L' , que denominamos de conjunto de manobras eficazes.

É claro que ao final $L' \lll L$. Em geral L' é bastante reduzido após este tratamento, diminuindo bastante o trabalho do algoritmo descrito no Capítulo 5.

Uma análise semelhante pode ser feita para o caso da adição de elementos, só que para este caso deve-se fazer a análise em termos de cortes em vez de laços.