

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

"APLICAÇÕES DE MÉTODOS COMBINATÓRIOS À ESTIMAÇÃO
DE ESTADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA: DETERMINAÇÃO DE
MEDIDAS E CONJUNTOS CRÍTICOS E ALOCAÇÃO DE PSEUDOMEDIDAS"

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

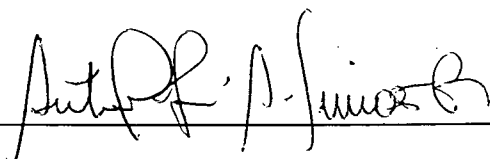
THELMA SOLANGE PIAZZA

Florianópolis, Julho 1989

APLICAÇÕES DE MÉTODOS COMBINATÓRIOS À ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA : DETERMINAÇÃO DE MEDIDAS E CONJUNTOS CRÍTICOS E ALOCAÇÃO DE PSEUDOMEDIDAS CRÍTICAS

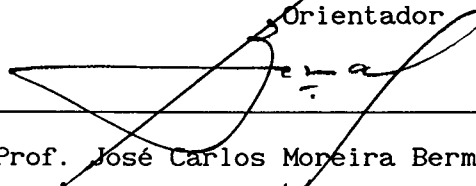
Thelma Solange Piazza

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



Prof. Antonio José A. Simões Costa, Ph.D.

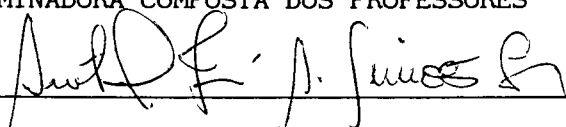
Orientador



Prof. José Carlos Moreira Bermudez, Ph.D.

Coordenador de Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

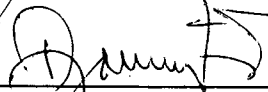
APRESENTADA PERANTE A BANCA EXAMINADORA COMPOSTA DOS PROFESSORES



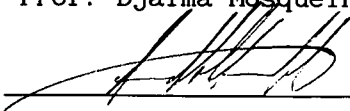
Prof. Antonio José A. Simões Costa, Ph.D.



Prof. Luiz Jairo Branco Machado, Dr. Ing.



Prof. Djalma Mosqueira Falcão, Ph.D.



Prof. Arnaldo Mandel, Ph.D.

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Antonio José Alves Simões Costa pela amizade e inestimável ajuda prestada ao longo deste trabalho.

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

Aos meus pais e familiares pelo apoio e incentivos recebidos.

À Vânia Aparecida Mattozo pela datilografia.

À Universidade Federal de Santa Catarina pelo apoio técnico e ao CNPq pelo apoio financeiro.

RESUMO

Este trabalho trata da aplicação de métodos topológicos derivados da Teoria de Matróides a problemas ligados à observabilidade de sistemas de potência e a deficiências em planos de medição usados na estimação de estados destes sistemas. São propostos métodos para determinação de medidas e conjuntos críticos e para alocação de pseudomedidas críticas nos casos de não-observabilidade do sistema.

Inicialmente, o trabalho trata da introdução de diversas melhorias em um método enumerativo já existente para a determinação de medidas e conjuntos críticos. Torna-se assim possível uma confrontação adequada de seus resultados com os do método não-enumerativo cujo desenvolvimento é um dos objetivos principais do trabalho.

Posteriormente, são abordadas técnicas para a alocação de pseudomedidas críticas. Tal como o procedimento para determinar medidas críticas, a técnica proposta é essencialmente topológica e baseada na Teoria de Matróides.

O desempenho dos métodos propostos é testado usando-se quatro Sistemas de Potência, sendo dois deles sistemas realísticos de concessionárias brasileiras.

ABSTRACT

This work deals with the application of topological methods derived from Matroid Theory to problems related to the observability of Power Systems and to deficiencies of metering configurations. Methods to determine critical measurements and critical sets and for critical pseudomeasurements placement when the system is unobservable are proposed.

Initially, the work discusses the introduction of several improvements on an existent enumerative method to determine critical measurements and critical sets. These improvements allow an adequate comparison of the enumerative method results with those obtained via a non-enumerative method whose development is one of the main objectives of this work.

Later, techniques for critical pseudomeasurements placement are proposed. Similarly to the procedure for critical measurement determination, the presented technique is essentially topological and based on Matroid Theory.

Four test systems are used to evaluate the performance of the proposed methods. Two of them are realistic power systems of Brazilian utilities.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

1.1 Introdução.....	1.
1.2 Revisão Bibliográfica.....	2
1.3 Organização do Trabalho.....	4

CAPÍTULO II - PROBLEMAS COMBINATÓRIOS ASSOCIADOS A SISTEMAS ELÉTRICOS
DE POTÊNCIA: OBSERVABILIDADE TOPOLÓGICA, DETERMINAÇÃO
DE MEDIDAS E CONJUNTOS CRÍTICOS E ALOCAÇÃO DE PSEUDOMEDIDAS

2.1 Introdução.....	6
2.2 Estimação de Estados.....	6
2.2.1 Modelo de Medição.....	7
2.2.2 Método dos Mínimos Quadrados.....	8
2.2.3 Detecção e Identificação de Medidas Portadoras de Erros Grosseiros.....	9
2.2.4 Desacoplamento $P-\delta Q-V$	11
2.3 Observabilidade	
2.3.1 Definição.....	13
2.3.2 Observabilidade $P-\delta Q-V$	14
2.3.3 Observabilidade Topológica.....	15
2.4 Medidas e Conjuntos Críticos	
2.4.1 Medidas Críticas.....	17
2.4.2 Conjuntos Críticos.....	18
2.5 Alocação de Pseudomedidas em Planos de Medição Deficientes.....	20
2.6 Considerações Finais.....	21

CAPÍTULO III - TEORIA DE MATRÓIDES

3.1 Introdução.....	22
3.2 Terminologia, Notação e Fundamentos da Teoria dos Grafos.....	22
3.2.1 Notação e Definições Básicas.....	22
3.2.2 Teoria de Grafos.....	23
3.3 Conceitos Básicos sobre Matróides.....	26
3.4 Exemplo de Matróides.....	27
3.4.1 Matróide Vetorial.....	27
3.4.2 Matróide do Grafo.....	28

3.4.3	Matróide Transversal.....	28
3.5	Definições e Propriedades Básicas.....	30
3.6	Sistema Axiomático para Matróides.....	33
3.7	Interseção de Matróides.....	35
3.7.1	Introdução.....	35
3.7.2	Sequência de Aumento.....	36
3.7.3	Método para Determinação de Interseção da Máxima Cardinalidade entre Dois Matróides.....	37
3.8	Método para Determinação de Elementos Críticos de Interseção de Matróides.....	41
3.8.1	Introdução.....	41
3.8.2	Método para Determinação de Elementos Críticos.....	41

CAPÍTULO IV - APLICAÇÃO DE TEORIA DE MATRÓIDES A ANÁLISE DE OBSERVABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

4.1	Introdução.....	46
4.2	Fundamentação do Problema.....	46
4.3	Aplicação do Algoritmo de Interseção de Matróides à Análise da Observabilidade.....	47
4.4	Implementação do Método para Análise da Observabilidade Topológica.....	51
4.4.1	Considerações Gerais.....	51
4.4.2	Observabilidade $P-\delta \setminus Q-V$	51
4.4.3	Algoritmo de Interseção de Matróides Aplicado à Análise de Observabilidade Topológica.....	52

CAPÍTULO V - DETERMINAÇÃO DE MEDIDAS E CONJUNTOS CRÍTICOS

5.1	Introdução.....	57
5.2	Utilização de Método Topológico.....	58
5.3	Método Enumerativo para Determinação de Medidas e Conjuntos Críticos.....	59
5.3.1	Considerações Gerais.....	59
5.3.2	Descrição do Método Enumerativo.....	59
5.3.3	Alterações Implementadas para Melhoria de Eficiência Computacional.....	60
5.4	Método Não-Enumerativo para Determinação de Medidas e Conjuntos	

Críticos.....	68
5.4.1 Cosiderações Gerais.....	68
5.4.2 Fundamentação do Problema.....	68
5.4.3 Aplicação do Algoritmo para Determinação de Elementos Críticos de Interseção de Matróides.....	69
5.4.4 Aplicação do Algoritmo para Determinação de Conjuntos Críticos.....	73
5.4.5 Criticidade $P-\delta \setminus Q-V$	75

CAPÍTULO VI - ALOCAÇÃO DE PSEUDOMEDIDAS CRÍTICAS A PLANOS DE MEDIÇÃO DEFICIENTES

6.1 Introdução.....	80
6.2 Fundamentação Teórica.....	80
6.3 Descrição do Algoritmo para Alocação de Pseudomedidas Críticas.....	83
6.4 Fluxograma Geral.....	87
6.5 Considerações Finais.....	88

CAPÍTULO VII - RESULTADOS

7.1 Introdução.....	90
7.2 Determinação de Medidas e Conjuntos Críticos.....	91
7.2.1 Considerações Gerais.....	91
7.2.2 Medidas Críticas.....	92
7.2.3 Conjuntos Críticos.....	93
7.3 Análise dos Resíduos Normalizados.....	94
7.4 Análise dos Resultados de Criticidade das Medidas de Módulo de Tensão.....	97
7.5 Ganhos Computacionais Obtidos pela Alterações Implementadas no Procedimento Enumerativo que Determina Medidas e Conjuntos Críticos.....	99
7.6 Comparação entre Procedimento Enumerativo e Não-Enumerativo para Determinação de Medidas Críticas.....	103
7.7 Recuperação de Planos de Medição Deficientes.....	106
7.7.1 Alocação de Pseudomedidas Críticas.....	106
7.7.2 Análise do Espalhamento do Erro Grosseiro Presente em Medidas Críticas.....	107

CAPÍTULO VIII - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	
8.1 Conclusões.....	109
8.2 Sugestões para Futuros Trabalhos.....	110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112
APÊNDICE I - IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DOS PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE DE OBSERVABILIDADE; PARA DETERMINAÇÃO DE MEDIDAS E CONJUNTOS CRÍTICOS E ALOCAÇÃO DE PSEUDOMEDIDAS CRÍTICAS.....	115
APÊNDICE II - DIAGRAMAS UNIFILARES E PLANOS DE MEDIÇÃO DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA UTILIZADOS PARA TESTES.....	121

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

Devido ao rápido crescimento dos Sistemas Elétricos de Potência, que se reflete em uma maior complexidade e interdependência, ficou patente a necessidade da monitoração adequada destes sistemas, bem como de se assegurar uma operação segura, econômica e eficiente dos mesmos.

Com este objetivo, a Estimação de Estados de Sistemas de Potência (EESP) foi incorporada aos centros de controle de operação dos sistemas, pois esta é uma ferramenta básica de monitoração em tempo real, da qual depende o desempenho das técnicas para análise de segurança.

A EESP determina a melhor estimativa para o vetor de magnitudes e ângulos de tensão de todas as barras da rede elétrica (n estados). Ela também possui uma função relacionada ao processamento de erros grosseiros, que consiste na detecção, identificação e eliminação das medidas errôneas que porventura existam no conjunto de telemidas.

As telemidas utilizadas pela EESP são, geralmente, de módulo de tensão, injeção de potência ativa e reativa e fluxos de potência ativa e reativa nas linhas:

A confiabilidade dos resultados fornecidos pela EESP implica em se assegurar um bom desempenho das funções relacionadas ao processamento de erros grosseiros.

Este bom desempenho pode ser comprometido pela presença de medidas e conjuntos críticos. Se alguma medida crítica for portadora de erro grosseiro, este não é mais detectado. Se, por outro lado, alguma medida pertencente a um conjunto crítico também contiver erro grosseiro, este pode ser detectado; contudo, a medida não pode ser identificada.

Tendo em vista o impacto que estas medidas exercem sobre a estimação, o presente trabalho objetiva a obtenção de um método combinatório que se utiliza da estrutura e topologia do plano de medição e da rede, para a determinação de medidas e conjuntos críticos em planos de medição na EESP. Assim, de posse das mesmas, o operador estará alerta quanto à vulnerabilidade do plano de medição quando este é submetido às funções

relacionadas ao processamento de erros grosseiros.

O número m de telemidas existentes no plano de medição e a distribuição geográfica das mesmas constituem-se em outros fatores que influenciam a estimação. Ou seja, para que haja convergência do processo de estimação é preciso que o conjunto de telemidas possua uma redundância global satisfatória e uma boa estrutura topológica. Satisfeitos estes quesitos, diz-se que o sistema é observável.

Caso se verifique que o sistema é não observável, procedimentos adicionais devem ser investigados a fim de viabilizar a estimação. Neste trabalho, propõe-se a alocação de pseudomedidas críticas a planos de medição deficientes com o intuito de restaurar a observabilidade dos mesmos.

Tanto o método combinatório para determinar medidas críticas quanto o procedimento para alocar pseudomedidas críticas se baseiam na Teoria de Matrôides. O algoritmo para análise de observabilidade topológica proposto em [5] se baseia igualmente nesta teoria, sendo o mesmo também descrito neste trabalho.

A título de referência para confrontação do método para determinar medidas críticas a ser desenvolvido, o qual vai se tratar de uma extensão ao algoritmo para análise de observabilidade topológica [5], propõe-se aqui o aprimoramento de um método enumerativo previamente proposto em [10] a fim de melhor julgar o desempenho do primeiro. Este aprimoramento consiste em aperfeiçoamento na sua eficiência computacional e adequação do mesmo a situações realísticas de operação.

1.2 Revisão Bibliográfica

A questão da observabilidade de Sistemas Elétricos de Potência foi inicialmente investigada por Clements e Wollenberg [1]. Estes autores propõem um algoritmo baseado na topologia da rede e nas Leis de Kirchhoff, o qual, apesar de conservativo, lança as bases para o estudo da observabilidade topológica.

Em 1980, Krumpholz, Clements e Davis [2] propõem um algoritmo baseado em um teorema fundamental o qual coloca como condição necessária e suficiente para a observabilidade topológica a existência de uma árvore geradora observável. Em [2] ainda se introduz conceitos de observabilidade algébrica, numérica e topológica.

Um algoritmo também baseado na busca de uma árvore geradora observável A.G.O. para verificação da observabilidade é proposto por Simões Costa e A. Mandel [5]. Este algoritmo se baseia na interseção de matróides para a verificação da existência ou não da A.G.O., sendo que para planos não-observáveis a floresta observável maximal é encontrada. Tal algoritmo é utilizado neste trabalho.

Outros métodos combinatórios têm sido propostos para análise da observabilidade, tais como a técnica enumerativa de Van Cutsem [4] e o uso do conceito de emparelhamento em grafos bipartidos originalmente proposto por Simões Costa [3], o qual apresenta resultados reconhecidamente conservativos.

Quando a análise prévia da observabilidade indica que o plano de medição considerado é não-observável, este deve ser convenientemente tratado. Para tanto, Clements, Krumpholz e Davis [12], [13] e Van Cutsem [4] apresentam algoritmos topológicos que se concentram em expandir a floresta observável maximal através de sucessivas adições de pseudomedidas convenientes, até que se obtenha uma A.G.O., ou seja, até que se adquira a observabilidade topológica. Outra estratégia adotada para o tratamento de planos de medição deficientes consiste na estimação das partes observáveis do sistema, independentemente da adição de pseudomedidas às partes não-observáveis [13], [4]. Finalmente, pode-se ainda estimar os estados do maior subsistema observável obtido da expansão da floresta observável maximal conforme propõe E. dos Santos [15].

A não-detectabilidade das medidas críticas foi verificada através de Clements, Krumphoz e Davis [6], os quais estenderam o método para análise de observabilidade topológica por eles proposto a fim de possibilitar a determinação destas medidas. Van Cutsem [4] também define propriedades a respeito de medidas críticas e propõe um método enumerativo para a sua determinação, o qual é similar ao proposto por Simões Costa [10]. Quanto a procedimentos numéricos, S. Amaral [16] propõe um método que se baseia na análise das variâncias dos resíduos, as quais devem ser nulas para as medidas críticas.

A não-identificabilidade das medidas errôneas pertencentes a conjuntos críticos foi demonstrada por Clements e outros [6], [9], sendo que Ayres e Haley [7] propõem dois algoritmos para a determinação de conjuntos críticos. O primeiro é de caráter topológico e se utiliza de um algoritmo de análise de observabilidade [13]. O segundo método é de caráter numérico, e

consiste no estabelecimento de uma faixa de tolerância para comparação dos resíduos normalizados e em propriedades dos elementos da matriz de covariância dos resíduos.

Simões Costa [10] propõe um método topológico e enumerativo o qual, devido a sucessivas recorrências ao algoritmo para análise de observabilidade [5], torna-se mais apropriado para estudos "off-line". Este método é tratado neste trabalho, onde se procura aplicar propriedades e procedimentos heurísticos com o intuito de melhorar sua eficiência computacional.

Uma filosofia diferente quanto à análise da observabilidade e alocação de pseudomedidas é proposta por Wu e Monticelli [30],[31]. Estes autores propõem métodos segundo os quais estas questões são tratadas ao longo do processo iterativo de solução do problema de estimação de estados. Os algoritmos correspondentes se utilizam de cálculos em ponto flutuante e são baseados na fatoração triangular da matriz Ganho.

A abordagem adotada neste trabalho, por outro lado, procura resolver os problemas de análise de observabilidade, recuperação de planos de medição deficientes e determinação de medidas e conjuntos críticos antes de se iniciar o processo de estimação propriamente dito.

1.3 Organização do trabalho

O capítulo II apresenta a formulação do problema de Estimação de Estado (EESP) pelo Método dos Mínimos Quadrados Ponderados e a técnica para processamento de medidas com erros grosseiros. Apresenta também um estudo sobre o desacoplamento $P-\delta/Q-V$ e descreve a questão da observabilidade de planos de medição submetidos à Estimação de Estados. Ainda é apresentada a definição de medidas e conjuntos críticos, assim como a importância da determinação das mesmas. Finalmente, é feito um estudo a respeito da recuperação de planos de medição deficientes sujeitos à EESP.

O capítulo III é reservado a uma breve introdução à Teoria de Matróides, sendo aí descritos métodos para determinação de interseção de matróides e para determinação de elementos críticos de interseção de matróides.

No capítulo IV apresenta-se a aplicação do método de determinação de interseção de matróides à questão da análise de observabilidade. O algoritmo daí advindo está proposto em [5].

Um método enumerativo para determinação de medidas e conjuntos críticos proposto em [11] é descrito no capítulo V, assim como alterações nele implementadas com o intuito de melhorar seu desempenho computacional e operacional. Neste capítulo também é apresentada a aplicação do método para determinação de elementos críticos de interseção de matróides à determinação de medidas críticas, sendo que o mesmo é convenientemente integrado ao algoritmo enumerativo que determina conjuntos críticos.

A questão da recuperação de planos de medição deficientes é apresentada no capítulo VI, no qual é proposto um algoritmo que aloca pseudomedidas críticas. Este algoritmo é derivado dos algoritmos para análise de observabilidade e para determinação de medidas críticas.

Os resultados obtidos em decorrência dos métodos propostos neste trabalho são apresentados no capítulo VII. Para tanto, utilizam-se dois sistemas-teste usuais e duas configurações derivadas do Sistema interligado da região Sul do Brasil.

Finalmente, no capítulo VIII apresentam-se as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO II

PROBLEMAS COMBINATÓRIOS ASSOCIADOS A SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA: OBSERVABILIDADE TOPOLÓGICA, DETERMINAÇÃO DE MEDIDAS E CONJUNTOS CRÍTICOS E ALOCAÇÃO DE PSEUDOMEDIDAS

2.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo apresentar o processo de Estimação de Estados de Sistemas de Potência, assim como os sub-problemas combinatórios a ele correlatos. Ou seja, formula-se a questão da observabilidade, a questão da existência de medidas e conjuntos críticos e a da alocação de pseudomedidas em planos de medição deficientes.

A seção 2.2 se concentra na formulação matemática para a Estimação de Estados, sendo utilizado o Método dos Mínimos Quadrados Ponderados para a solução da mesma. A seção trata também da apresentação de métodos para detecção e identificação de medidas portadoras de erros grosseiros. A seção 2.3 apresenta o problema da observabilidade de Sistemas Elétricos de Potência, sendo dada ênfase à observabilidade topológica. Em seguida, na seção 2.4, definem-se medidas e conjuntos críticos, cuja importância é relevante no processamento de erros grosseiros. Finalmente, na seção 2.5, aborda-se a questão da recuperação de planos de medição deficientes, os quais não contêm informação suficiente para permitir a Estimação de Estado do sistema de potência.

2.2 Estimação de Estados

A função do estimador de estado em sistemas de potência é fornecer o vetor das variáveis de estado \underline{x} da rede a partir de um conjunto de medidas feitas nas barras e linhas do sistema elétrico obtidas através de sistemas de medição e teletransmissão. Este conjunto de medidas deve possuir um nível adequado de redundância para, além de garantir a estimação completa das variáveis da rede, também permitir a identificação e eliminação de medidas portadoras de erros grosseiros.

2.2.1 Modelo de Medição

Considere um sistema de potência com N barras para o qual se faça m medições.

O vetor de estados \underline{x} é um vetor formado por $N - 1$ ângulos de tensão (o ângulo da barra de referência é conhecido) e N módulos de tensão de barra. Ou seja, \underline{x} é formado por n estados em que $n = 2N - 1$.

O vetor \underline{y} de medidas do sistema é composto por módulos de tensão, injeções de potência ativa e reativa nas barras, fluxos de potência ativa e reativa nas linhas. Cada uma das quantidades medidas possui um erro de medição decorrente de imprecisão dos medidores, do sistema de comunicação, erros no modelo matemático, etc. O conjunto dos erros de medição é representado pelo vetor $\underline{\eta}$.

O vetor \underline{y} de medidas se relaciona com as variáveis de estado \underline{x} e com o vetor dos erros de medição $\underline{\eta}$, por meio de uma função não-linear $\underline{h}(\cdot)$, conforme a eq. (2.1) [27], [28].

$$\underline{y} = \underline{h}(\underline{x}) + \underline{\eta} \quad (2.1)$$

$$E\{\underline{\eta} \cdot \underline{\eta}^t\} = R \quad (2.2)$$

onde:

N : número de barras da rede;

\underline{y} : vetor de medidas ($m \times 1$);

$\underline{h}(\cdot)$: vetor das funções não-lineares que relaciona as quantidades medidas e as variáveis de estado ($m \times 1$);

\underline{x} : vetor de variáveis de estado ($m \times 1$), onde $n = 2N - 1$ representa o número de variáveis de estado;

$\underline{\eta}$: vetor dos erros de medição ($m \times 1$);

$E\{\cdot\}$: valor esperado;

R : matriz de covariância dos erros de medição ($m \times m$).

O vetor das funções não-lineares $\underline{h}(\underline{x})$ de (2.1) representa as relações baseadas nas leis de Kirchhoff e na lei de Ohm, ou seja, seus parâmetros são dependentes da topologia e das características da rede elétrica.

A matriz de covariância R se reduz a uma matriz diagonal devido à consideração de que os erros de medição são independentes. Os seus elementos

diagonais são as variâncias dos erros de medição, calculadas como funções da precisão dos medidores e do sistema de transmissão de dados.

2.2.2 Método dos Mínimos Quadrados Ponderados

O método mais usado para estimar os estados \underline{x} de uma rede elétrica é o método dos Mínimos Quadrados Ponderados, o qual consiste em minimizar a soma dos quadrados dos resíduos de estimação, ponderados pela matriz diagonal R . Um resíduo de estimação é a diferença entre os valores medido e estimado de uma variável (eq. 2.3):

$$\underline{r} = \underline{y} - \underline{h}(\hat{\underline{x}}) \quad (2.3)$$

Portanto, a estimativa $\hat{\underline{x}}$ de \underline{x} é obtida minimizando-se:

$$J(\hat{\underline{x}}) = \underline{r}^t \cdot R^{-1} \cdot \underline{r} \quad (2.4)$$

Para contornar o problema da não-linearidade de $\underline{h}(\cdot)$, o qual dificulta a solução do problema de estimação de dados, a equação (2.1) é linearizada em torno do vetor de estado \underline{x}^k . A função custo a ser minimizada toma então a forma:

$$J(\Delta\underline{x}) = [\Delta\underline{y} - H(\underline{x}^k) \cdot \Delta\underline{x}]^t \cdot R^{-1} \cdot [\Delta\underline{y} - H(\underline{x}^k) \cdot \Delta\underline{x}] \quad (2.5)$$

onde:

$\Delta\underline{x} \stackrel{\Delta}{=} \underline{x} - \underline{x}^k$: vetor de correções para o vetor atual de estado \underline{x}^k ($n \times 1$);

$\Delta\underline{y} \stackrel{\Delta}{=} \underline{y} - \underline{h}(\underline{x}^k)$: vetor incremental de medidas ($m \times 1$);

$$H(\underline{x}^k) \stackrel{\Delta}{=} \left. \frac{\partial \underline{h}(\underline{x})}{\partial \underline{x}} \right|_{\underline{x} = \underline{x}^k} \quad \text{: Matriz Jacobiana}$$

A condição necessária para mínimo é dada por:

$$\frac{\partial J(\Delta\underline{x})}{\partial \Delta\underline{x}} \stackrel{\Delta}{=} \underline{0} \quad (2.6)$$

a qual fornece a chamada equação normal de Gauss:

$$H^t(\underline{x}^k) \cdot R^{-1} \cdot H(\underline{x}^k) \cdot \Delta \underline{x} = H^t(\underline{x}^k) \cdot R^{-1} \cdot \Delta \underline{y} \quad (2.7)$$

A solução final do problema de estimação de estados é obtida através de um procedimento iterativo em que $\Delta \underline{x}$ é calculado a cada iteração resolvendo-se (2.7). O vetor $\Delta \underline{x}$ é então utilizado para atualizar o estado corrente, obtendo-se assim o novo vetor de estados a ser utilizado na iteração seguinte.

A equação (2.7) pode ser assim reescrita:

$$G \cdot \Delta \underline{x} = H^t(\underline{x}^k) \cdot R^{-1} \cdot \Delta \underline{y} \quad (2.8)$$

onde

$$G = H^t(\underline{x}^k) \cdot R^{-1} \cdot H(\underline{x}^k) \quad (2.9)$$

é a matriz Ganho ($n \times n$).

O uso da equação(2.8) para se estimar n estados processando-se m medidas, onde $m \geq n$, requer que G seja uma matriz não-singular. Sendo R uma matriz diagonal não-singular, isto implica em que a matriz Jacobiana H deve ter posto igual a n . Para isto, é preciso que se disponha de, pelo menos, um conjunto de n medidas tais que as n linhas correspondentes na matriz Jacobiana sejam linearmente independentes.

Ainda quanto a definição de resíduo, salienta-se que é possível expressá-lo também como uma função do erro, advindo a seguinte expressão [29]:

$$\underline{r} = S \cdot \underline{y} \quad (2.10)$$

onde S é chamada matriz de Sensibilidade.

$$S = I - H \cdot G^{-1} \cdot H^t \cdot R^{-1} \quad (2.11)$$

Ou seja, os resíduos são combinações lineares dos erros de medição, isto é, um resíduo contém informações sobre vários erros de medição.

2.2.3 Detecção e Identificação de Medidas Portadoras de Erros Grosseiros

Os erros porventura existentes em qualquer medida pertencente a um dado plano de medição acarreta uma avaliação incorreta do estado real do

sistema de potência. Assim, a detecção e a identificação de medidas portadoras de erros grosseiros assumem um importante papel dentro da estimação de estados, já que têm por objetivo torná-la a mais confiável possível.

O método de detecção de medidas com erros grosseiros é baseado em um teste de hipóteses utilizando o índice $J(\Delta \underline{x})$, que é a soma ponderada dos quadrados dos resíduos para o modelo linearizado [3], [29].

Os erros de medição são números aleatórios, de modo que os valores $J(\Delta \underline{x})$ também o são. Admitindo a hipótese de que os erros seguem uma lei de função de probabilidade normal, então $J(\Delta \underline{x})$ tem uma distribuição do qui-quadrado com $m-n$ graus de liberdade [29].

Considerando uma probabilidade de falso alarme α_0 pré-fixada, o índice $J(\Delta \underline{x})$ é comparado a K , que corresponde ao percentual $(1 - \alpha_0)$ da distribuição do qui-quadrado com $m-n$ graus de liberdade.

Se $J(\Delta \underline{x}) < K$, conclui-se que não existem erros grosseiros dentro do nível de confiança especificado. Se $J(\Delta \underline{x}) \geq K$, por outro lado, conclui-se que existe pelo menos um erro grosseiro, o qual deve ser identificado e eliminado.

Caso seja detectada a presença de erros grosseiros, cabe agora identificar quais as medidas de \underline{y} que são contaminadas por esses erros.

A identificação é realizada dividindo-se cada resíduo de estimação r_i por seu desvio padrão, que é dado pela raiz quadrada do elemento Cr_{ii} da matriz de covariância dos resíduos.

Seja o vetor erro de estimação dado por $\underline{x} - \hat{\underline{x}}$, onde \underline{x} é o vetor estado real e $\hat{\underline{x}}$ é o vetor de estado estimado. A matriz C_e de covariância dos erros de estimação é dada por [29]:

$$C_e = [H^t(\hat{\underline{x}}^k) \cdot R^{-1} \cdot H(\hat{\underline{x}}^k)]^{-1} \quad (2.12)$$

e a matriz de covariância dos resíduos é então escrita como [29]:

$$C_r = R - H(\hat{\underline{x}}^k) \cdot C_e \cdot H^t(\hat{\underline{x}}^k) \quad (2.13)$$

Assim:

$$r_{N,i} = \frac{r_i}{\sqrt{Cr_{ii}}}, \quad i = 1, \dots, m \quad (2.14)$$

Após a normalização, a medida que corresponde ao máximo resíduo normalizado é a mais provável de ser a portadora de erro grosseiro. Esta deve ser eliminada e o processo de estimação reiniciado até que não se detecte mais medidas com erros grosseiros.

Porém, quando existem erros grosseiros múltiplos, não há certeza a respeito da correspondência entre os resíduos normalizados máximos e os maiores erros de medição. Diante deste fato, constata-se a necessidade de se incorporar métodos mais sofisticados para a detecção de erros grosseiros múltiplos [8],[16],[24].

2.2.4 Desacoplamento P- δ /Q-V

A estimação de estados pode ser feita utilizando-se um modelo de medição que faz uso do desacoplamento P- δ /Q-V. Este desacoplamento é baseado no princípio de que as medidas de potência ativa possuem mais informação sobre os ângulos de tensão nas barras do que sobre seu módulo, enquanto que as medidas de potência reativa fornecem maiores informações sobre o valor dos módulos da tensão do que a cerca dos ângulos de tensão.

Para assegurar a convergência do processo iterativo, normalmente o uso do desacoplamento requer que as linhas de transmissão do sistema de potência apresentem relações $X \setminus R$ (reatância para resistência) altas.

Para utilização do modelo desacoplado, o vetor de estado \underline{x} é definido como:

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} \underline{x}_\delta \\ \underline{x}_v \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

sendo que

\underline{x}_δ : vetor do ângulo das tensões das $N - 1$ barras do sistema
($N - 1 \times 1$)

\underline{x}_v : vetor do módulo das tensões nas N barras do sistema ($N \times 1$).

O modelo de medição pode ser particionado da seguinte maneira [6]:

$$\begin{bmatrix} \underline{y}_p \\ \underline{y}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{h}_p(\underline{x}_\delta, \underline{x}_v) \\ \underline{h}_q(\underline{x}_\delta, \underline{x}_v) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{\eta}_p \\ \underline{\eta}_q \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

onde:

- \underline{y}_p : vetor que compreende as m_t medidas de fluxo de potência ativa e m_p medidas de injeção de potência ativa $[(m_t + m_p) \times 1]$;
- \underline{y}_q : vetor que compreende as m_u medidas de fluxo de potência reativa, m_q medidas de injeção de potência reativa e m_v medidas de módulo de tensão $[(m_u + m_q + m_v) \times 1]$;
- η_p, η_q : vetores de erros de medição de medidas de fluxo ativo e injeção ativa e de fluxo reativo, injeção reativa e módulo de tensão, respectivamente;
- $\underline{h}_p, \underline{h}_q$: vetores de funções não-lineares relacionadas aos vetores de estado.

A matriz Jacobiana pode ser assim expressa:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial \underline{h}_p(\underline{x}_\delta, \underline{x}_v)}{\partial \underline{x}_\delta} & \frac{\partial \underline{h}_p(\underline{x}_\delta, \underline{x}_v)}{\partial \underline{x}_v} \\ \frac{\partial \underline{h}_q(\underline{x}_\delta, \underline{x}_v)}{\partial \underline{x}_\delta} & \frac{\partial \underline{h}_q(\underline{x}_\delta, \underline{x}_v)}{\partial \underline{x}_v} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Seja um sistema de potência que satisfaça as condições exigidas para a utilização do desacoplamento P- δ /Q-V, mencionadas no início desta seção. Nesta circunstância, é possível se considerar um acoplamento mais forte entre as variáveis ativas e os ângulos (P- δ) e entre as variáveis reativas e tensões (Q-V). Então, os elementos da diagonal da matriz Jacobiana são predominantes em relação aos elementos fora da diagonal de H. Deste modo, H pode ser representada da seguinte maneira [6], [3]:

$$H = \begin{bmatrix} H_\delta & 0 \\ 0 & H_v \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

A estrutura das matrizes $H\delta$ e Hv depende da localização de medidores e da topologia da rede, sendo que a partir destas matrizes são feitas as seguintes observações [2]:

a) As medidas de fluxo em uma linha de transmissão se relacionam com os módulos e os ângulos de tensão nas barras terminais da linha considerada.

b) Uma medida de injeção em uma barra inter-relaciona a tensão na barra medida com as tensões de todas as barras conectadas à barra medida;

c) A medida de tensão de uma barra somente informa sobre a magnitude de tensão na barra em que a medida é realizada.

Para que a estimação desacoplada seja realizável é preciso agora que a matriz $H\delta$ tenha posto igual a $N - 1$ e a matriz Hv tenha posto igual a N [2], [4].

2.3 Observabilidade

2.3.1 Definição

Um sistema de potência é observável no sentido da estimação estática de estados, com respeito a um dado conjunto de medidas M se as variáveis de estado do sistema podem ser determinadas através do processamento das medidas em M por um estimador de estados. Em caso contrário, o sistema é considerado não-observável com respeito a M .

O problema da observabilidade consiste, portanto, em se determinar se as medidas que compõem um determinado plano de medição fornecem informação suficiente para a estimação dos estados do sistema. Fica claro, então, a importância em se analisar a observabilidade antes de se executar a estimação de estados. Caso M se configure como não-observável, pode-se utilizar de procedimentos que sanem a deficiência de M ; alternativamente, pode-se, ainda, abrir mão do objetivo de se estimar os estados do sistema como um todo. Assim, vê-se que na operação em tempo real, a análise da observabilidade visa melhorar a eficiência do estimador de estados.

Na fase de planejamento também é importante a utilização da análise da observabilidade, a fim de garantir uma redundância razoável ao sistema, em caso de perda de algumas medidas durante a operação.

A fim de operacionalizar a análise de observabilidade, caracteriza-se este conceito em termos de certas matrizes e grafos associados

à topologia da rede e ao plano de medição, advindo daí os conceitos de observabilidade algébrica, numérica e topológica.

Conforme visto na subseção 2.2.2, para que o processo de estimação de estado seja realizável é necessário que a matriz H tenha posto igual a n . Baseado nesta assertiva é possível se relacionar a questão da observabilidade com o posto de H .

Assim, um sistema é definido como sendo algebricamente observável com respeito a um conjunto de medidas se a matriz H possui posto igual a n , que é a dimensão do vetor de estado \underline{x} [2], [5].

Um sistema de potência é numericamente observável com respeito a M se as estimativas para os estados podem ser obtidas através de solução iterativa partindo de valores iniciais $|v| = 1,0$ pu e $\delta = 0$ radianos em todas as barras do sistema [2], [5].

Observa-se que, além da arbitrariedade da escolha dos valores iniciais, a definição de observabilidade numérica sofre de diversas imprecisões. Por exemplo, a definição depende do algoritmo de estimação empregado, do tamanho da palavra utilizada para armazenar as variáveis envolvidas, etc...

A observabilidade numérica implica na observabilidade algébrica, embora a recíproca não seja verdadeira. Isto decorre do fato de que, apesar da matriz H apresentar posto teoricamente completo, podem sobrevir dificuldades no decorrer do processo iterativo, impossibilitando a sua convergência.

A utilização destes conceitos para a determinação a priori da observabilidade são inviáveis porque o tempo de cálculo por eles exigido não é compatível com aplicações em tempo real, isto é, é muito superior ao tempo de execução do processo de estimação de estados propriamente dito. Contudo, através da análise da topologia de um grafo derivado da rede original e de acordo com a distribuição das medidas neste grafo, é possível se obter o conceito de observabilidade topológica. Este conceito, além de computacionalmente eficiente, fornece indicações sobre os pontos onde o plano de medição necessita de reforço em caso de sistemas não-observáveis, e sua análise independe do ponto de operação do sistema.

2.3.2 Observabilidade P- δ /Q-V

Antes de se passar ao conceito de observabilidade topológica, cabe salientar que, utilizando-se o desacoplamento P- δ /Q-V da subseção 2.2.4, o

estudo da observabilidade pode ser decomposto no estudo da observabilidade P- δ e da observabilidade Q-V. Ou seja, a análise da observabilidade pode ser realizada separadamente para as partes P- δ e Q-V.

O primeiro problema a ser reconhecido é que a presença de medidas de módulo de tensão no subconjunto das medidas reativas introduz uma assimetria entre os dois sub-problemas P- δ e Q-V. Esta dificuldade pode ser contornada lançando-se mão do procedimento sugerido em [4], descrito a seguir.

A partir do grafo G inicial da rede, um grafo G' aumentado é construído conectando-se todos os nós de G em que são feitas medidas de tensão a um nó adicional (nó terra) através de arestas de susceptância fictícia. Cada medida de tensão é então substituída por uma medida de fluxo de potência reativa equivalente na linha fictícia.

Este artifício possibilita a análise da observabilidade das medidas reativas do mesmo modo pelo qual são tratadas as medidas ativas.

Para planos de medição onde não existe paridade entre as medidas ativas e reativas, os algoritmos que analisam a observabilidade devem ser aplicados duas vezes. Quando as medidas de fluxo e injeção são tomadas aos pares (ativo/reactivo) com uma medida de tensão na barra de referência, conclusões sobre o sub-problema P- δ e Q-V podem ser obtidas a partir de uma única aplicação dos algoritmos de observabilidade [2], [4].

2.3.3 Observabilidade topológica

A definição de observabilidade topológica é expressa em termos do grafo de rede, e em termos da associação das medidas que formam o plano de medição às arestas do grafo da rede.

O grafo da rede é formado por vértices que correspondem às barras do sistema de potência, e por arestas correspondentes às linhas de transmissão.

Cada medida z pertencente a um conjunto de medidas M pode ser associada a uma aresta a do grafo da rede se:

1 - z é uma medida de fluxo na linha de transmissão que corresponde à aresta a ;

2 - z é uma medida de injeção em uma das barras terminais da linha correspondente à aresta a .

Uma árvore geradora do grafo da rede é uma árvore cujo conjunto de vértices é igual ao conjunto de barras do sistema considerado. Uma árvore

geradora é observável com respeito ao plano de medição M se e somente se for possível associar uma medida z pertencente a M a cada uma de suas arestas, sem que existam duas arestas associadas a mesma medida [5].

Uma floresta F do grafo da rede é um subgrafo que não contém circuitos. Uma floresta F é observável com respeito a M se for possível associar uma medida z pertencente a M a cada uma de suas arestas sem que existam duas arestas associadas a mesma medida.

Os teoremas seguintes, enunciados por Krumpholz, Clements e Davis [2], servem de base para a definição de observabilidade topológica:

Teorema 1:

"Se um sistema de potência é algebricamente observável com respeito a um conjunto de medidas M , então existe uma árvore geradora no grafo da rede que é observável e cujas arestas são associadas a medidas em M ".

Teorema 2:

"Considere que existe uma árvore geradora observável (A.G.O.) no grafo da rede cujas arestas são associadas a medidas em M . Caso o vetor formado pelas impedâncias-série das linhas de transmissão não se encontre sobre uma determinada superfície C de dimensão $(N - 1)$, o sistema é algebricamente observável com respeito às medidas M ".

Segundo o Teorema 1, sempre que um sistema de potência for algebricamente observável, existe uma A.G.O., sendo que a recíproca nem sempre é verdadeira. Contudo, levando em consideração que a ressalva do teorema 2 é improvável de ocorrer na prática, é possível se afirmar que para os casos práticos de interesse a observabilidade algébrica implica na existência da A.G.O. e vice-versa. Devido ao carácter topológico da busca da árvore geradora observável, introduz-se a seguinte definição [2]:

Um sistema de potência é topologicamente observável com respeito a um conjunto de medidas M se existir uma A.G.O. do grafo da rede do sistema com respeito a M .

Uma maneira de melhor visualizar esta definição é redefiní-la em termos do grafo de medição associado a um dado plano de medição M . Os vértices e arestas do grafo de medição ZM são assim definidos:

- 1 - Os vértices de ZM são os mesmos vértices do grafo da rede;
- 2 - Se o fluxo na linha $i - j$ é medido, então os vértices i e j em ZM são conectados por uma aresta que será associada àquela medida de fluxo (aresta de fluxo);
- 3 - Se a injeção na barra i é medida, o vértice i em ZM será

conectado a cada um de seus vértices adjacentes mediante arestas que serão todas associadas à medida de injeção (arestas de injeção).

O grafo de medição contém todas as possíveis arestas que podem ser associadas às medidas em ZM. A figura 2.3.1 ilustra um grafo de medição ZM montado a partir do grafo de rede e correspondente conjunto de medidas M a ele associadas:

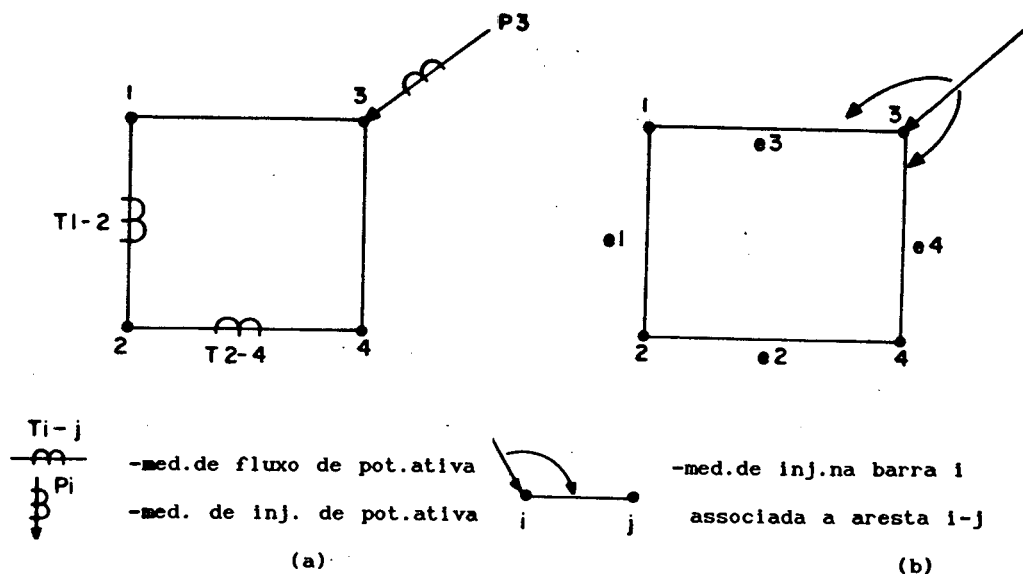


Figura 2.3.1 (a) Plano de Medição, (b) Grafo de Medição ZM

Observe-se que as medidas de fluxo T_{1-2} e T_{2-4} estão associadas às arestas e_1 e e_2 de ZM, respectivamente, e que a medida de injeção está associada às arestas e_3 e e_4 de ZM.

Assim, um sistema de potência é topologicamente observável com respeito a um conjunto de medidas M se existir uma árvore geradora no grafo de medição, com a restrição de que esta árvore não poderá conter mais do que uma aresta associada a uma dada medida [5].

2.4 Medidas e Conjuntos Críticos

2.4.1 Medidas Críticas

Considerando a matriz Jacobiana H , uma medida é dita ser crítica quando a supressão desta do conjunto de medidas M diminui o posto de H de uma unidade. Ou seja, a eliminação de uma medida crítica transforma um sistema observável em não-observável [10].

Uma medida crítica contém a única informação sobre uma certa variável de estado, a qual não pode ser estimada se aquela não for disponível.

As medidas críticas gozam das seguintes propriedades:

Propriedade 1: O resíduo de uma medida crítica é nulo, seja qual for o valor numérico ou fator de ponderação desta medida [4], [6], [7].

Esta caracterização numérica é facilmente compreendida tendo em vista a não-existência de nenhuma observação redundante com este tipo de medida; ou seja, uma medida crítica provê informação que não é fornecida por qualquer outra medida.

Esta propriedade mostra que a presença de medidas críticas portadoras de erros grosseiros não pode ser determinada pelos métodos de detecção de erros grosseiros (ver seção 2.2.3), sendo assim designados por medidas não-detectáveis.

Propriedade 2: As linhas e colunas da matriz de Sensibilidade S correspondentes a medidas críticas são nulas [4].

Desta propriedade se conclui que uma medida crítica não interage com qualquer outra medida, ou seja, um erro arbitrário sobre uma medida crítica não afeta os resíduos de outras medidas. Portanto, não são afetadas as estimativas obtidas a partir destas outras medidas. É possível, contudo, se determinar um conjunto de quantidades estimadas afetadas por uma medida crítica espúria.

Propriedade 3: Considere um sistema observável. Seja T o conjunto de quantidades estimadas afetadas por uma medida crítica errônea. Suponha que a medida crítica é eliminada do conjunto de medidas. Então os elementos de T são quantidades que, se medidas e acrescentadas individualmente ao plano de medição, incrementariam de uma unidade o posto de H [4].

2.4.2 Conjuntos Críticos

Define-se um conjunto crítico como um subconjunto de medidas de M tal que a perda de qualquer destas medidas torna as restantes simultaneamente críticas. Ou seja, a supressão de duas quaisquer medidas integrantes a um conjunto crítico diminui de uma unidade o posto de H [10].

Propriedade 1: Um conjunto crítico com respeito a uma dada configuração de medidas e topologia da rede possui todos os seus resíduos normalizados iguais [9].

Relembrando que a identificação de medidas errôneas é realizada

tendo por base o maior resíduo normalizado (seção 2.2.3), conclui-se que a identificação de qualquer medida errônea integrante de um conjunto crítico é impraticável. Embora a presença de um erro grosseiro em uma medida de um conjunto crítico possa ser detectada, tal erro não pode ser identificado.

As definições de medidas e conjuntos críticos podem ser vistas como casos particulares da noção mais geral de conjunto k -crítico. Diz-se que um subconjunto S de medidas de M é k -crítico, sendo k um número inteiro, se:

1 - Qualquer conjunto de k medidas pertencentes a S , se removido do plano de medição, deixa o sistema ainda observável;

2 - Qualquer conjunto de $k + 1$ medidas pertencentes a S se removido do plano de medição, torna o sistema não-observável.

3 - Nenhum elemento de um conjunto k -crítico pode pertencer a outros conjuntos de ordem menor que k .

Neste trabalho, o maior interesse estará concentrado principalmente em conjuntos k -críticos, onde k é igual a 0 e 1. Se S é formado por uma medida crítica, S é um conjunto 0-crítico; por outro lado, conjuntos 1-críticos serão referenciados aqui simplesmente como conjuntos críticos.

Segundo as propriedades de medidas e conjuntos críticos, conclui-se que a presença destas medidas em planos de medição sujeitos à Estimação de Estados de Sistemas de Potência (EESP) pode comprometer o desempenho das funções ligadas ao processamento de erros grosseiros. Assim, é importante que se disponha de meios de detectar tais medidas, tanto na operação em tempo real quanto no estágio de projeto "off-line", onde são feitos estudos de localização de medidores antes da implementação da EESP.

Na operação em tempo real é importante que o operador esteja informado da presença de medidas não-detectáveis e/ou não-identificáveis a fim de que seja capaz de melhor julgar os resultados fornecidos pelas rotinas que processam erros grosseiros. De posse das medidas e conjuntos críticos, o operador estará alerta a respeito da vulnerabilidade do plano de medição no que tange à detecção e identificação de medidas errôneas. Já no projeto "off-line", cujo objetivo é obter um plano de medição para EESP que forneça resultados precisos e confiáveis mesmo diante de contingências no sistema de telemedição, o projetista deve se assegurar de que um erro grosseiro em qualquer medida sempre possa ser detectado e identificado. Isto implica na inexistência de medidas e conjuntos críticos no plano de medição.

2.5 Alocação de Pseudomedidas Em Planos de Medição Deficientes

Antes de se proceder a uma estimação de estados, é preciso se assegurar que o plano de medição corrente configura um sistema observável sobre várias condições normais de operação. É, portanto, necessário, neste estágio, se eliminar eventuais deficiências no plano de medição que possa acarretar perda da observabilidade.

A perda da observabilidade pode se dar por falhas de telemedição, perdas de linhas ou ser devida a certas representações de sistemas externos para análise de segurança conforme [4]. A perda da observabilidade pode se dar ainda como resultado da eliminação de medidas detectadas e identificadas como portadoras de erros grosseiros pelo próprio processo de estimação de estados.

As estratégias adotadas em situações de não-observabilidade são as seguintes [2], [4]:

a) Incorporar informações adicionais adequadas ao sistema de modo a restaurar a observabilidade global e assim dar prosseguimento à estimação usual;

b) Identificar subsistemas observáveis, executar a estimação independente em cada um deles e usar informações adicionais adequadas a fim de determinar os estados das regiões não-observáveis;

c) Restringir a estimação a regiões observáveis.

A estratégia (c) não é, em geral, satisfatória, pois não apresenta qualquer informação ao operador do estado sobre as regiões não-observáveis.

As duas primeiras estratégias exigem a introdução de um banco de dados adicional, de modo a prover informação sobre todo o sistema. Estes dados podem se originar da última estimação de estados ou de procedimentos auxiliares tais como: previsão de carga em barras ou procedimentos estatísticos baseados no histórico das últimas estimações [14].

É importante salientar que as pseudomedidas inseridas em M são, em geral, menos confiáveis que as medidas reais, ou seja, suas propriedades estatísticas são menos conhecidas. Entretanto, sabe-se da seção 2.4 que uma medida crítica não interage com outras medidas, ou seja, que um erro arbitrário sobre uma medida crítica não afeta o resíduo de outras medidas. Infere-se destas observações que as pseudomedidas devem ser críticas a fim de que seus erros não contaminem as partes observáveis do sistema.

Assim, deve-se ter em mente que a adequada localização das

pseudomedidas deve ser feita de modo que as mesmas sejam críticas. Isto assegura que seus erros não se espalharão e que todas as telemedidas são exploradas ao máximo. Para que isto aconteça, o número necessário de pseudomedidas adicionadas deve ser dado por:

$$p = (N - 1) - t \quad (2.19)$$

sendo que:

p = número de pseudomedidas críticas,
 t = número de telemedidas incluídas na floresta observável maximal,
 N = número de barras do sistema.

Se apenas p pseudomedidas são adicionadas e se a adição destas tornar o sistema observável, então estas p pseudomedidas são críticas. Se forem adicionadas mais do que p pseudomedidas, o excedente são quantidades redundantes que podem contaminar as partes observáveis do sistema.

2.6 Considerações Finais

O princípio da Estimação de Estados dos Sistemas de Potência foi apresentado, baseado no Método dos Mínimos Quadrados Ponderados e incluindo as etapas de detecção e identificação de erros grosseiros simples.

Definiu-se os conceitos de observabilidade numérica, algébrica e topológica e a noção de desacoplamento entre as partes P- δ /Q-V, o que viabiliza a determinação da observabilidade P- δ e a observabilidade Q-V em separado.

Através das propriedades de medidas e conjuntos críticos, constata-se a importância da sua determinação, devido ao fato de serem não-detectáveis e não-identificáveis, respectivamente. Ou seja, o desempenho das funções relacionadas ao processamento de erros grosseiros fica comprometido caso alguma destas medidas sejam espúrias.

Também salientou-se a estratégia que aloca pseudomedidas críticas para a recuperação de planos de medição deficientes.

CAPÍTULO III

TEORIA DE MATRÓIDES

3.1 Introdução

Este capítulo apresenta uma breve introdução à Teoria de Matróides. O seu principal objetivo é preencher a lacuna encontrada em artigos recentes sobre o uso de métodos combinatórios em Sistemas de Potência que, apesar de recorrerem à Teoria de Matróides, não têm feito menção explícita a seus fundamentos.

As perspectivas da aplicação da Teoria de Matróides na Engenharia são amplas, inclusive em Sistemas Elétricos de Potência. Por exemplo, a teoria de matróides apresenta ferramentas para a determinação de observabilidade [5], determinação de conjuntos k -críticos [19] e alocação de pseudomedidas. E, é para compreender adequadamente estas ferramentas que definições e algoritmos básicos a respeito desta teoria são apresentados neste capítulo.

A organização do capítulo é a seguinte: a seção 3.2 apresenta notações e conceitos básicos sobre teoria de conjuntos e teoria de grafos para melhor compreensão do desenrolar do capítulo. As seções 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 mostram as definições e conceitos básicos que caracterizam um matróide. Em seguida, na seção 3.7 apresenta-se o método para determinação de interseção de matróides, cuja aplicabilidade inicialmente se evidencia na determinação de observabilidade de Sistemas Elétricos de Potência. E a seção 3.8 desenvolve o método para determinação de elementos críticos da interseção de matróides, que é utilizada para a detecção de conjuntos k -críticos em planos de medição ligados à Estimação de Estados.

3.2 Terminologia, Notação e Fundamentos da Teoria de Grafos

3.2.1 Notação e definições Básicas

A representação simbólica de conjuntos é feita por letras maiúsculas, enquanto que a de elementos pertencentes a conjuntos é feita por

letras minúsculas.

A notação $Z = X \setminus Y$ significa que Z é obtida suprimindo-se de X todos os elementos de Y que também pertencem a X . Por exemplo:

$$\begin{aligned} \text{Se } X &= \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\} \text{ e} \\ Y &= \{e_1, e_3, e_4, e_6, e_7, e_8\}, \end{aligned}$$

então

$$X \cap Y = \{e_1, e_3, e_4\}$$

e

$$Z = X \setminus Y = \{e_2, e_5\}$$

O símbolo Δ representa a diferença simétrica entre dois conjuntos quaisquer:

$$A \Delta B = (A \setminus B) \cup (B \setminus A), \text{ ou}$$

$$A \Delta B = (A \cup B) \setminus (A \cap B)$$

Ou melhor, a diferença simétrica é o conjunto união dos dois conjuntos com exceção dos elementos que pertencem a ambos simultaneamente.

O termo cardinalidade de um conjunto é o número de elementos deste conjunto.

Seja um conjunto S e seu subconjunto S' . Diz-se que S' é maximal em relação a uma certa propriedade P , quando S' satisfaz a propriedade P e não existe um subconjunto S'' que contém S' que também satisfaça P , ou seja, S' não está contido em nenhum subconjunto de S que satisfaz P . Por outro lado, S' é minimal em relação a P , quando S' satisfaz P e não existe um subconjunto S'' contido em S' que também satisfaça P .

3.2.2 Teoria de Grafos [20], [21]

Um grafo $G = (V, E)$ consiste de um conjunto de elementos $V = \{v_1, v_2, \dots\}$ chamados vértices e de outro conjunto $E = \{e_1, e_2, \dots\}$ cujos elementos são chamados arestas, tal que cada aresta e_k é identificada por um par $\{v_i, v_j\}$ de vértices.

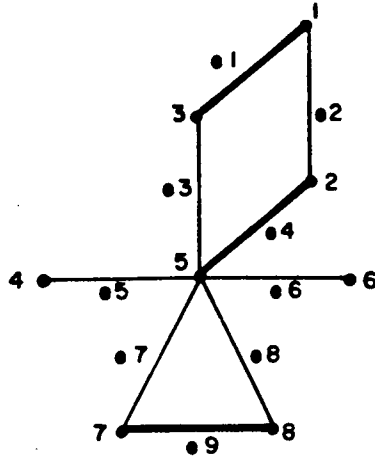
Um grafo bipartido $G_b(A, B) = (A, B, E)$ é um grafo tal que seu conjunto de vértices pode ser particionado em dois subconjuntos A e B , de tal modo que cada aresta E possui um de seus vértices terminais incidente em A e o outro em B .

Um ciclo é um conjunto de arestas que formam um caminho fechado em um grafo.

Uma árvore de G é um grafo acíclico conexo, ou seja, é um conjunto

Um subconjunto M das arestas de um grafo é um emparelhamento se seus elementos não são adjacentes.

Por exemplo:



$$M = \{e_1, e_4, e_9\}$$

Figura 3.2.1 - Exemplo Ilustrativo de Emparelhamento

Os vértices do grafo da fig. 3.2.1 cujas arestas pertencem a M são chamados vértices saturados. Em contrapartida, os que não pertencem a M são chamados vértices não-saturados.

Considerando um grafo G qualquer e um emparelhamento M definido sobre G , define-se uma sequência de troca sobre este grafo como um caminho cujas arestas pertencem alternadamente a $E \setminus M$ e M . No exemplo da figura 3.2.1, o conjunto abaixo é um exemplo de uma sequência de troca:

$$St = \{e_1, e_2, e_4, e_6\}$$

Uma sequência de aumento é uma sequência de troca, cujos vértices inicial e final são não-saturados.

A seguir, mostra-se um exemplo de emparelhamento M em um grafo bipartido $G_b(A, B)$:

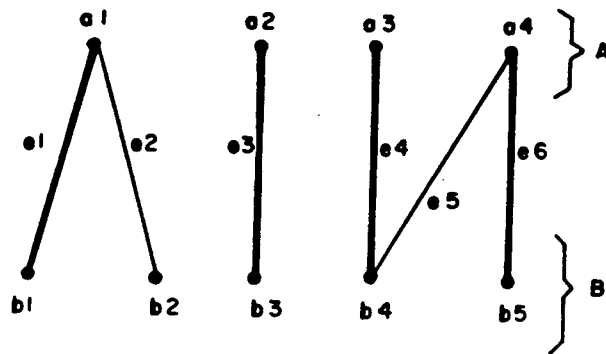


Figura 3.2.2 - Exemplo de Emparelhamento em Grafo Bipartido

Seja $\alpha = \{A_j\}$ uma coleção de subconjuntos de um conjunto finito E .

Um subconjunto $I = \{e_{11}, e_{12}, \dots, e_{1k}\}$ é um transversal parcial de α , se existem elementos A_1, A_2, \dots, A_k de α tal que $e_{11} \in A_1$, $e_{12} \in A_2$, e $e_{1k} \in A_k$.

Seja:

$$E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\},$$

e

$$\alpha = \{A_1, A_2, A_3\},$$

onde:

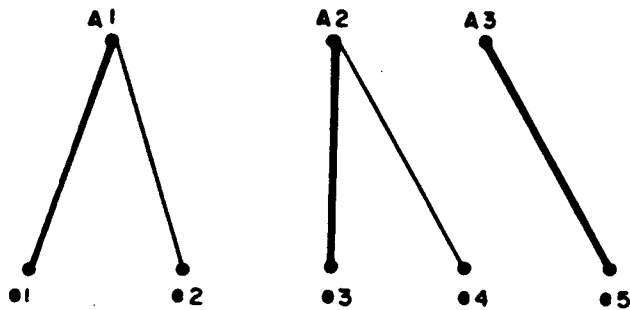
$$A_1 = \{e_1, e_2\}, A_2 = \{e_3, e_4\} \text{ e } A_3 = \{e_5\}$$

Logo:

$$I = \{e_1, e_3, e_5\}$$

é um transversal parcial de α .

Em geral, pode-se representar transversais parciais em termos de grafos bipartidos e emparelhamentos, como mostrado na figura 3.2.3.



$$I = \{e_1, e_3, e_5\}$$

Figura 3.2.3 - Representação do Transversal Parcial em Termos de Um Grafo Bipartido e Emparelhamento

3.3 Conceitos Básicos Sobre Matróides

Um matróide $M = (S, \mathcal{I})$ é uma estrutura onde S é um conjunto finito de elementos e \mathcal{I} é uma família de subconjuntos de S , chamados conjuntos independentes, tal que:

- O conjunto vazio é um conjunto independente;
- Se I pertence a \mathcal{I} , então todos os subconjuntos de I são também conjuntos independentes;
- Se $X = \{x_1, \dots, x_r\}$ e $Y = \{y_1, \dots, y_{r+1}\}$ pertencem a \mathcal{I} , então existe $y_i \in Y \setminus X$ tal que $X \cup y_i$ é também um conjunto independente pertencente a \mathcal{I} .

Portanto, um matróide consiste de um conjunto de elementos S e de uma família de subconjuntos de S , os quais obedecem aos três quesitos de independência acima.

Seja, por exemplo, uma matriz $A(m \times n)$ e seus vetores colunas $X = \{\underline{x}_1, \dots, \underline{x}_n\}$. Os subconjuntos de vetores linearmente independentes formam uma coleção de conjuntos independentes, pois facilmente é verificado (exemplo 3.3.1, a seguir) que os mesmos satisfazem as condições de independência já mencionadas. Então, o conjunto X e a coleção \mathcal{I} definem um matróide $M = (X, \mathcal{I})$.

Exemplo 3.3.1: Considere a matriz $A(3 \times 4)$:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

O conjunto $I = \{(1, 0, 0)^t, (0, 1, 0)^t, (0, 0, 1)^t\}$ é composto por vetores colunas linearmente independentes. Qualquer subconjunto de I , por exemplo, $I' = \{(1, 0, 0)^t, (0, 1, 0)^t\}$ ou até mesmo $I'' = \emptyset$ também são conjuntos linearmente independentes, portanto o primeiro e segundo quesitos estão satisfeitos.

Seja agora:

$$X = \{(1, 0, 0)^t\},$$

$$Y = \{(1, 0, 0)^t, (0, 1, 0)^t, (0, 0, 1)^t\},$$

$$Y \setminus X = \{(0, 1, 0)^t, (0, 0, 1)^t\}$$

$$\text{Então se } y = (0, 1, 0)^t :$$

$X \cup y = \{(1, 0, 0)^t, (0, 1, 0)^t\}$ é composto por vetores colunas linearmente independentes.

Pode-se verificar desse modo que as três condições para que os subconjuntos I de vetores colunas linearmente independentes sejam uma coleção de conjuntos independentes \mathcal{I} estão satisfeitas.

A partir deste exemplo, observa-se que é possível caracterizar $M = (X, \mathcal{I})$ como uma abstração de matriz, o que deu origem ao nome "matróide".

3.4 Exemplo de Matróides

3.4.1 Matróide Vetorial: $M = (S, \mathcal{I}), [20]$

Define-se um matróide vetorial como $M = (S, \mathcal{I})$, onde S é um subconjunto qualquer de um espaço vetorial V e os subconjuntos de S , linearmente independentes em V , são definidos como a coleção de conjuntos independentes \mathcal{I} .

3.4.2 Matróide do Grafo: $M = (E, \mathcal{J})$, [20]

Seja G um grafo qualquer, onde E   o conjunto de arestas de G , e $E_s = \{e_1, \dots, e_s\}$ um subconjunto de E .

Se $\{e_1, \dots, e_s\}$ não cont m caminhos fechados em G , isto  , se este subconjunto   uma floresta de G , então E_s   definido como um conjunto independente. O conjunto de todos os subgrafos aciclicos de G formam a cole o de conjuntos independentes. Pode-se verificar que, com esta lei de forma o, \mathcal{J} satisfaz as propriedades de defini o de matróides.

Exemplo 3.4.2.1: Matróide do grafo de medi o $M=(E, \mathcal{J})$

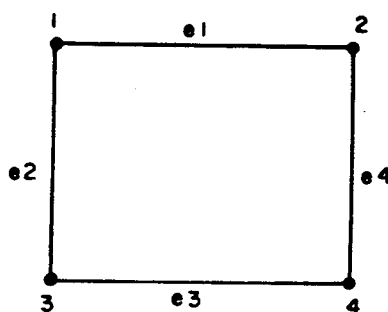


Figura 3.4.1 - Grafo de Medi o ZM

$$E = \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$$

$$\mathcal{J} = \{\emptyset, e_1, e_2, e_3, e_4, (e_1, e_2), (e_1, e_3), (e_1, e_4), (e_2, e_3), (e_2, e_4), (e_3, e_4), (e_1, e_2, e_3), (e_1, e_2, e_4), (e_2, e_3, e_4)\}$$

3.4.3 Matróide Transversal: $M=(E, \mathcal{J})$, [17]

Define-se um matróide transversal como $M = (E, \mathcal{J})$, onde E   um conjunto finito de elementos e o conjunto de transversais parciais definidos sobre E formam a cole o de conjuntos independentes [17].

Ao se representar transversal parcial em termos de grafo bipartido, os emparelhamentos completos deste compreendem o conjunto de transversais parciais, ou seja, a cole o de conjuntos independentes .

Exemplo 3.4.3.1: Matrízide transversal em termos de grafo bipartido de medição $ZM(A, B)$.

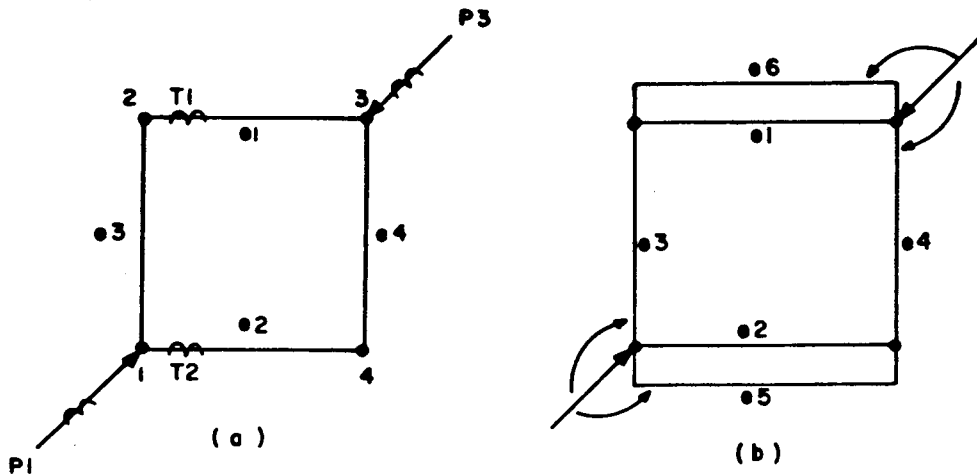


Figura 3.4.2 - (a) Plano de Medição M,
(b) Grafo de medição ZM

$$E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6\}$$

$$\alpha = \{T1, T2, P1, P3\} \text{ onde } T1 = \{e_1\}, T2 = \{e_2\}, P1 = \{e_3, e_5\}, P3 = \{e_4, e_6\}$$

A partir destes dados, define-se $ZM(A, B)$ onde:

$A = \{T1, T2, P1, P3\}$, conjunto das medidas que formam o plano de medição, e

$B = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6\}$, conjunto das arestas do grafo de medição ZM associadas as medidas de A.

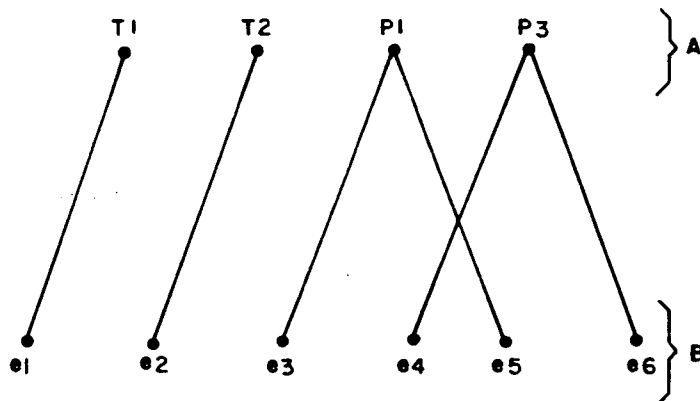


Figura 3.4.3 - Grafo Bipartido de Medição $ZM(A, B)$

Transversal parcial é o conjunto I pertencente a E , contido em um emparelhamento completo no grafo $ZM(A, B)$ da figura 3.4.3. Ou seja, o conjunto de todos os transversais parciais de E é dado por:

$$\mathfrak{I} = \{(e_1, e_2, e_3, e_4), (e_1, e_2, e_3, e_6), (e_1, e_2, e_5, e_4), (e_1, e_2, e_5, e_6)\}$$

Deve-se observar que cada aresta e_i pertencente a cada conjunto independente de \mathfrak{I} está associada a uma única medida de A .

3.5. Definições e Propriedades Básicas

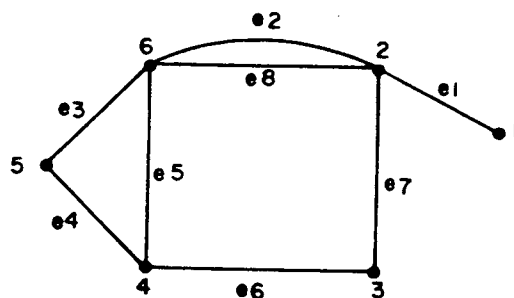
A teoria de matróides postula, como já exemplificado, certos conjuntos como "independentes" e desenvolve uma teoria a partir de axiomas que devem ser obedecidos a fim de que se mantenha a coleção de conjuntos independentes.

Cabe aqui fixar-se certas definições e propriedades básicas antes de se descrever o sistema axiomático para um matróide.

Uma base é um conjunto independente maximal de S , sendo a coleção de bases denotada por $\mathfrak{B}(M)$. Pode ser mostrado [20] que todas as bases de um matróide em S têm a mesma cardinalidade, isto é, todas as bases são compostas pelo mesmo número de elementos.

Um subconjunto de S que não pertença a \mathfrak{I} é chamado de conjunto dependente. Um conjunto dependente minimal é um circuito de M , sendo a coleção de circuitos denotada por $\mathfrak{C}(M)$.

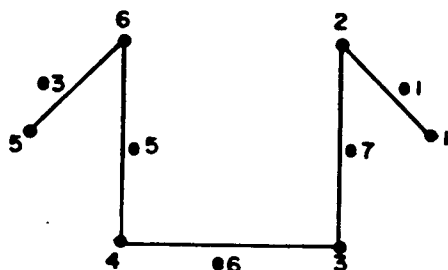
Seja $M = (E, \mathfrak{I})$ um matróide do grafo de medição $ZM1$ da Figura 3.5.1.



$$E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_8\}$$

Figura 3.5.1 - Grafo de Medição $ZM1$

Como ZM_1 é um grafo conexo, as bases de $M = (E, \mathcal{J})$ são árvores geradoras de ZM_1 , como por exemplo o da figura 3.5.2.



$$B_1 = \{e_1, e_3, e_5, e_6, e_7\}$$

Figura 3.5.2 - Árvore Geradora de ZM_1

Um subconjunto E_i de E é independente, se e somente se, não contém ciclos, isto é, caminhos fechados formados por seus elementos. Por exemplo, $E_i = \{e_1, e_2, e_3\}$ é um conjunto independente em $M = (E, \mathcal{J})$.

Em contrapartida, o subconjunto E_d de E , mostrado abaixo é dependente, já que contém caminhos fechados formados por seus elementos.

$$E_d = \{e_2, e_3, e_4, e_5, e_6\}$$

Já um circuito é exemplificado pelo conjunto $\{e_3, e_4, e_5\}$, o qual não contém nenhum outro conjunto dependente.

Propriedade 1: Se B é uma base de $M = (S, \mathcal{J})$ e $x \in S \setminus B$, então existe um único circuito C representado por $C(B, x)$, tal que:

$$x \in C, C \subseteq B \cup x$$

Este circuito $C(B, x)$ é chamado circuito fundamental de x sobre a base B .

Exemplificando através do matrôide do grafo de medição ZM_1 da figura 3.5.1:

$$B_1 = \{e_1, e_3, e_5, e_6, e_7\}$$

$$S \setminus B_1 = \{e_2, e_4, e_8\}$$

Seja $x = e_2$. Então:

$$C(B_1, e_2) = \{e_2, e_5, e_6, e_7\}$$

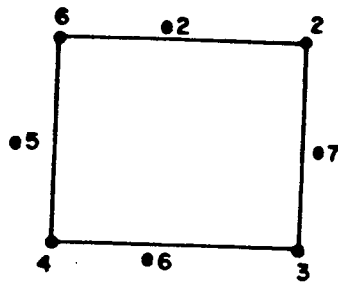


Figura 3.5.3 - Circuito fundamental $C(B_1, e_2)$

Propriedade 2: Se M é um matróide sobre S e B é uma base de M então, para qualquer $x \in S \setminus B$, $(B \setminus y) \cup x$ é uma base se e somente se $y \in C(B, x)$.

Baseado no exemplo da figura 3.5.1, escolhendo-se $x = e_2$, $y = e_7$, obtém-se:

$(B_1 \setminus e_7) \cup e_2 = \{e_1, e_2, e_3, e_5, e_6\}$ que é uma árvore geradora e, portanto, uma base de M , conforme indicado na figura 3.5.4.

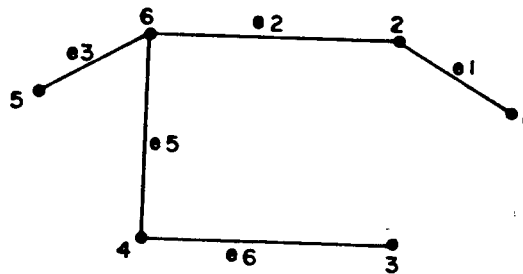


Figura 3.5.4 - $(B_1 \setminus e_7) \cup e_2$

Propriedade 3: Se C_1, C_2 são membros distintos de $\mathcal{C}(M)$ então, para cada $x \in (C_1 \cap C_2)$, existe um circuito $C_3 \in \mathcal{C}(M)$ tal que $C_3 = (C_1 \cup C_2) \setminus x$.

Exemplo 3.5.1 - Seja um matróide do grafo de medição $ZM1$, $M = (E, \mathcal{J})$. (Ver figura 3.5.5).

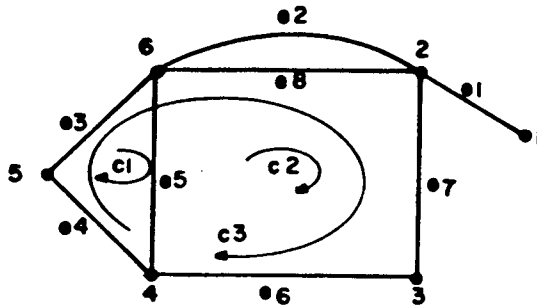


Figura 3.5.5 - Grafo de Medição $ZM1$

Então:

$$C1 = \{e_3, e_4, e_5\}$$

$$C2 = \{e_5, e_6, e_7, e_8\}$$

$$x = C1 \cap C2 = \{e_5\}$$

$$C3 = (C1 \cup C2) \setminus e_5 = \{e_3, e_4, e_6, e_7, e_8\}$$

A função posto de um matróide $M = (S, \mathcal{J})$, denotada por $\rho(S)$, é uma função definida como:

$$\rho(A) = \text{máx. } (|X| : X \subseteq A, X \in \mathcal{J}), A \subseteq S$$

A função posto $\rho(A)$ assume valores inteiros positivos.

O posto da matróide é igual a cardinalidade de uma base de $M=(S, \mathcal{J})$, ou seja, é a função posto para $A = S$.

O grafo de medição $ZM1$ do matróide $M=(E, \mathcal{J})$ da figura 3.5.1 é um grafo conexo, cuja base é uma árvore geradora. Então, o posto deste matróide é igual ao número de arestas da base (árvore geradora de $ZM1$), isto é, igual ao número de vértices do grafo menos uma unidade. No exemplo da figura 3.5.5, o posto do matróide é, portanto, igual a 5.

3.6 Sistema Axiomático Para Um Matróide

O conhecimento de base, ou circuito ou função posto, é suficiente para se determinar univocamente um matróide.

O sistema axiomático para um matróide, baseado em termos de cada um

destes conceitos, passa a ser descrito com o intuito de melhor visualizar a definição de matróide.

Axioma de Base

Uma coleção $\mathfrak{B}(M)$ de subconjuntos de S é o conjunto de bases de um matróide em S se e somente se \mathfrak{B} satisfaz a seguinte condição:

- Se $B_1, B_2 \in \mathfrak{B}$ e $x \in B_1 \setminus B_2$, existe um $y \in B_2 \setminus B_1$ tal que $(B_1 \cup y) \setminus x \in \mathfrak{B}$.

Exemplificando: Considere as seguintes árvores geradoras do grafo ZM_1 da figura 3.5.1, as quais são bases do matróide $M = (E, \mathcal{J})$.

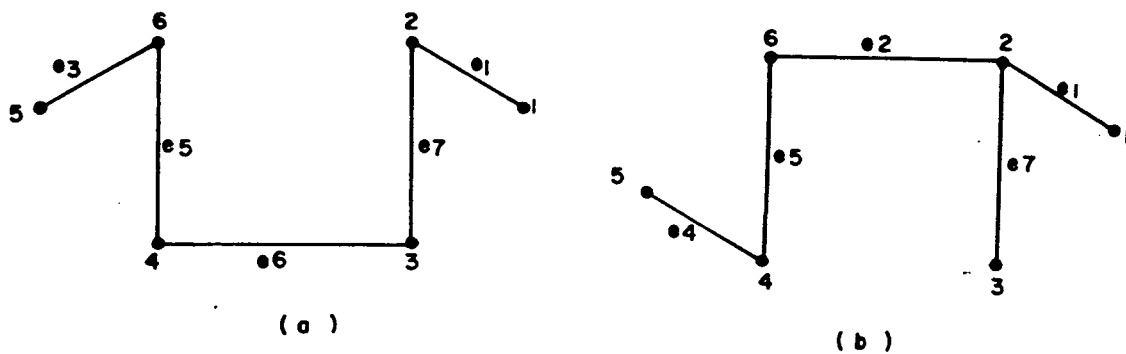


Figura 3.5.6 - (a), (b) Bases B_1 e B_2 , respectivamente, para o matróide de figura 3.5.1

Da diferença entre B_1 e B_2 escolhe-se um elemento x . Como:

$$(B_1 \setminus B_2) = \{e_2, e_6\}$$

seja $x = e_6$.

Da diferença entre B_2 e B_1 escolhe-se um elemento y . Já que:

$$(B_2 \setminus B_1) = \{e_4, e_2\}$$

seja $y = e_2$.

Aplicando a condição do axioma de base:

$$B_3 = (B_1 \cup y) \setminus x = \{e_1, e_2, e_3, e_5, e_7\}$$

observa-se que B_3 é uma árvore geradora, portanto uma base.

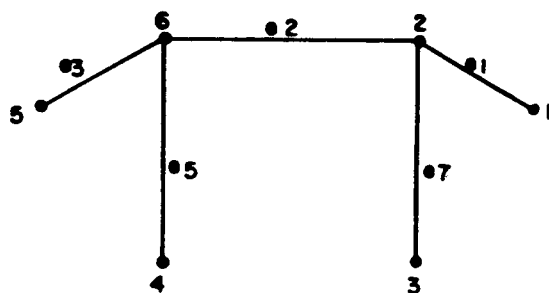


Figura 3.5.7 - $B_3 = \{e_1, e_2, e_3, e_5, e_7\}$

Axioma de Circuitos

Uma coleção $\mathcal{C}(M)$ de subconjuntos de S é o conjunto de circuitos de um matróide sobre S se e somente se as condições abaixo são satisfeitas:

- Nenhum membro de $\mathcal{C}(M)$ contém outro,
- Se C_1 e C_2 são membros de \mathcal{C} e $x \in C_1 \cap C_2$, então $(C_1 \cup C_2) \setminus x$ contém um membro de \mathcal{C} .

Esta última situação, já enunciada pela propriedade 3, é visualizada pela figura 3.5.5.

Axioma de Posto

Uma função $\rho(S)$ é a função posto $\rho: 2^S \rightarrow N$ de um matróide em S se e somente se para qualquer subconjunto X, Y de S e $x, y, z \in S$, as condições são satisfeitas:

- $\rho(\emptyset) = 0$
- $\rho(X) \leq \rho(X \cup y) \leq \rho(X) + 1$
- Se $\rho(X \cup y) = \rho(X \cup z) = \rho(X)$ então $\rho(X \cup y \cup z) = \rho(X)$

3.7 Interseção de Matróides

3.7.1 Introdução

Sejam dois matróides $M_1 = (S, \mathcal{I}_1)$, $M_2 = (S, \mathcal{I}_2)$ sobre o mesmo conjunto de elementos S , cujas famílias de conjuntos independentes são \mathcal{I}_1 e \mathcal{I}_2 respectivamente. Um conjunto $I \in \mathcal{I}_1 \cap \mathcal{I}_2$ é dito ser a interseção dos matróides M_1 e M_2 , onde I é independente tanto em M_1 quanto em M_2 [22], [23].

O problema da interseção de matróides foi tratado por muitos

autores, entre os quais destacam-se Welsh [20], que faz uso da propriedade da dualidade e Lawler [22], cujo estudo foi estendido por A. Frank [23] e Jack Edmonds que é referenciado por estes autores. O método que será descrito na seção 3.7.3, é uma adaptação do método pesquisado por Lawler e Frank ao problema da observabilidade topológica [22], [23].

Segundo Lawler [22], pode-se distinguir dois tipos de interseção: a interseção de cardinalidade, onde o objetivo é a obtenção de um conjunto I com máximo número de elementos; e interseção ponderada, onde I é formado por elementos cujos pesos somam o máximo possível, com respeito a uma dada ponderação de elementos.

Será dado destaque aqui à questão da interseção de cardinalidade, aplicável à análise da observabilidade de Sistemas de Potência.

O método aqui formulado está baseado em seqüências de aumento similares às utilizadas na determinação de emparelhamentos [21].

3.7.2 Sequência de Aumento [22]

Considere inicialmente um conjunto I que seja independente em M_1 e M_2 simultaneamente. Um conjunto de elementos distintos $E_i = \{e_1, e_2, \dots, e_i\}$, onde i é um inteiro positivo e ímpar, é uma seqüência de aumento se for possível adicionar a I os elementos ímpares e subtrair de I os elementos pares de E_i , de tal modo a ainda manter a independência em M_1 e M_2 e a incrementar de uma unidade a cardinalidade de I . Tendo em vista que o número de elementos adicionados é $[(i-1)/2] + 1$ enquanto que o de número subtraídos é $[(i-1)/2]$. verifica-se que ao se submeter I a uma seqüência de aumento, adiciona-se um elemento a mais em relação ao número de elementos subtraídos.

Já como seqüência de troca, entende-se uma seqüência E_i , com i par, cujo número de elementos adicionados e subtraídos a I são iguais, ou seja, a sua cardinalidade permanece inalterada.

Se, ao partir de um conjunto $I = \emptyset$, sucessivamente for se buscando seqüências de aumento, é possível se encontrar um conjunto I que é a interseção de máxima cardinalidade dos matróides M_1 e M_2 [22].

Para isto, passa-se à construção de uma seqüência de aumento a partir de I . O primeiro elemento da seqüência é e_1 , escolhido de forma que $I + e_1$ seja independente em M_1 . Se $I + e_1$ é também independente em M_2 , a seqüência está terminada. Em caso contrário, escolhe-se um elemento e_2 que

pertence ao circuito $C(I, e_1)$ em M_2 .

A sequência $I + e_1 - e_2$ é independente em ambos os matróides. A independência em M_1 deriva do fato de que, por definição, qualquer subconjunto de um conjunto independente também é independente. A independência em M_2 , por outro lado, vem das propriedades dos circuitos e conjuntos independentes.

Tenta-se agora adicionar um elemento e_3 de tal modo que $I + e_1 - e_2 + e_3$ seja independente em M_1 . É importante que se procure expandir I de maneira de $I + e_3$ não seja independente em M_1 , ou seja, que se utilize os elementos liberados em consequência da retirada de e_2 . A escolha de um elemento e_3 tal que $I + e_3 \in \mathcal{I}_1$, implica no truncamento da sequência de aumento já começada para inicialização de outra.

Se $I + e_1 - e_2 + e_3$ é dependente em M_2 , escolhe-se um elemento e_4 pertencente a este circuito e assim por diante.

Percebe-se que os elementos ímpares preservam a independência em M_1 e criam dependência em M_2 , a qual é restabelecida pela retirada dos elementos pares.

Seja $E_i = \{e_1, \dots, e_i\}$, a sequência de elementos adicionados e subtraídos a I . Se i for ímpar, significa que E_i é uma sequência de aumento, sendo que $I \Delta E_i$ é um novo conjunto independente I' , incrementado de um elemento em relação ao conjunto inicial I . Sucessivamente este novo conjunto I' é submetido a uma nova busca de sequência de aumento, até que não haja mais sequências de aumento e apenas sequências de troca (i par) sejam encontradas. Neste ponto, a interseção de máxima cardinalidade I_{\max} foi encontrada pois se apenas existirem sequências de troca significa que não há como aumentar a cardinalidade da última I submetida à última sequência de aumento.

Na verdade, o procedimento descrito acima é a essência de um algoritmo proposto em [22], o qual é formalizado de modo sistemático em [23], e é assunto da seção seguinte.

3.7.3 Método Para Determinação de Interseção de Máxima Cardinalidade entre Dois Matróides

Considere um conjunto I , o qual, por definição, é independente tanto em $M_1 = (S, \mathcal{I}_1)$ quanto em $M_2 = (S, \mathcal{I}_2)$.

Seja um grafo bipartido auxiliar $G_{ba}(V_1, V_2)$ cujos conjuntos de vértices V_1 e V_2 são elementos de S definidos da seguinte maneira:

$$V1 = \{v1 : v1 \in I\},$$

$$V2 = \{v2 : v2 \notin I\},$$

sendo que

$$S = V1 \cup V2$$

Por outro lado, o conjunto $V2$ contém os conjuntos $X0$, $X1$ e $X2$, onde:

$$X1 = \{x1 : x1 \notin I, I + x1 \in J1\}$$

$$X2 = \{x2 : x2 \notin I, I + x2 \in J2\}$$

$$X0 = \{x0 : x0 \in V2 \setminus (X1 \cup X2)\}$$

Sejam ainda $C1(I, v2)$ e $C2(I, v2)$ únicos circuitos de $I + v2$ em $M1$ e $M2$, respectivamente.

As arestas de Gba são assim formadas:

- Se $x \in V2$, $I + x \notin J1$ e $y \in C1(I, x)$, criar aresta $y \Rightarrow x$ em $Gba(V1, V2)$

- Se $x \in V2$, $I + x \notin J2$ e $y \in C2(I, x)$, criar aresta $x \Rightarrow y$ em $Gba(V1, V2)$.

Se for possível encontrar um caminho Umínimo do conjunto $X1$ para $X2$, então o novo conjunto I será $I \Delta Umín$, que possui um elemento a mais do que I , ou seja, a cardinalidade de I é incrementada de uma unidade.

A operação $I \Delta Umín$ equivale a retirar do conjunto união $I \cup Umín$ os elementos que pertencem simultaneamente a I e $Umín$, os quais ocupam as posições pares da sequência de elementos em $Umín$. Operacionalmente, o novo conjunto I é obtido pela adição a I dos elementos que ocupam as posições ímpares em $Umín$ e pela retirada de I dos elementos que ocupam as posições pares em $Umín$. Neste processo, adiciona-se a I um elemento a mais em relação ao número de elementos retirados de I .

Os próximos passos consistem então na sucessiva remontagem do grafo Gba até que não seja encontrado caminho de $X1$ para $X2$, significando que I é um conjunto independente de máxima cardinalidade comum a $M1$ e $M2$.

Em síntese, constrói-se sucessivamente o grafo Gba , buscando-se o caminho Umínimo, que na verdade é uma sequência de aumento, até que não seja mais possível incrementar a cardinalidade de I , isto é, até que não haja caminho de $X1$ para $X2$.

Cabe salientar aqui certas considerações sobre o método.

Da maneira como o grafo Gba é construído, observa-se, com o auxílio da figura 3.7.1, que de $X1$ apenas partem arestas direcionadas para $V1$; de $X2$ apenas chegam arestas de $V1$; de $X0$ chegam e partem arestas, enquanto que os

vértices em $X1 \cap X2$ não são ligados a nenhum outro vértice. Deste modo, fica fácil de compreender o porquê do caminho U_{\min} possuir $X1$ e $X2$ como vértices fonte e sumidouro, respectivamente, pois nunca um caminho que contenha um número ímpar de vértices teria um elemento de $X0$ como vértice sumidouro de uma sequência de aumento ou de troca.

Também é fácil visualizar que na inexistência de sequência de aumento (caminho de $X1$ para $X2$) é possível apenas se encontrar sequências de troca, isto é, caminhos de $V1$ para $V2$ ou vice-versa. Isto significa, como descrito na seção anterior, o término do método, pois I é um conjunto de máxima cardinalidade.

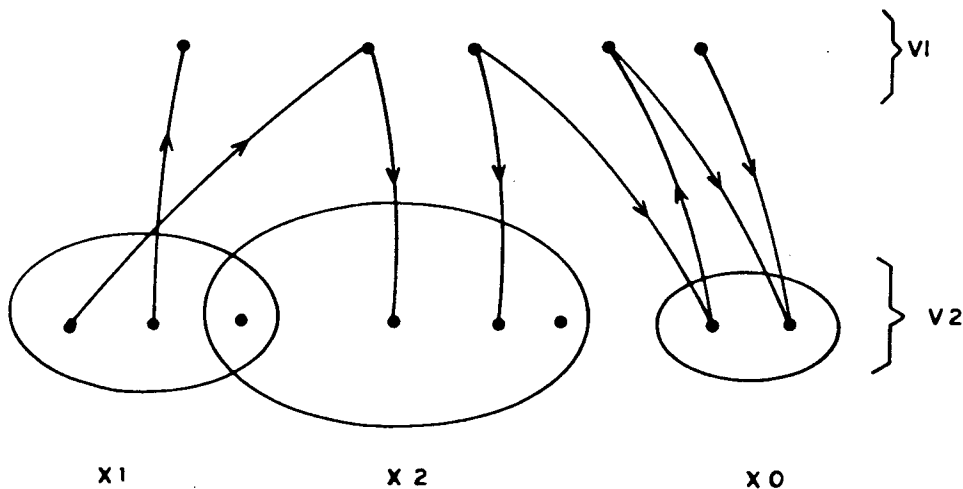


Figura 3.7.1 - Grafo Bipartido Auxiliar $Gba(V1, V2)$

A cada nova manipulação de Gba , I é incrementada de apenas uma unidade para cada U_{\min} encontrada. Este efeito é obtido tanto com um caminho U_{\min} quanto com um caminho U qualquer. Um caminho que não seja mínimo acarreta um remanejamento de maior número de vértices sendo adicionados e retirados de I , se comparado ao caminho U_{\min} . Assim, o método busca caminhos mínimos entre $X1$ e $X2$ para assegurar menor número de manipulações ao se submeter U_{\min} a I .

Exemplo de aplicação do método para determinação de interseção de matróides. Seja $M_1=(S, \mathcal{I}_1), M_2=(S, \mathcal{I}_2)$.

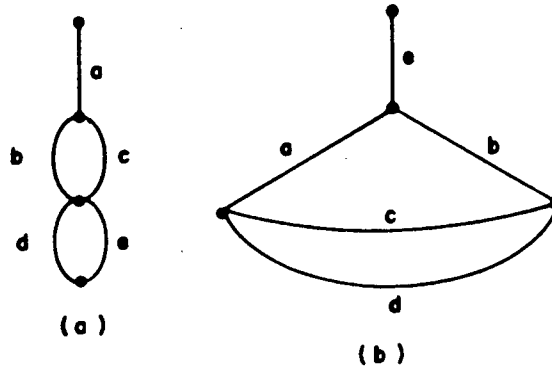


Figura 3.7.2(a) $M_1=(S, \mathcal{I}_1), (b) M_2=(S, \mathcal{I}_2)$

$V_1 = \emptyset$

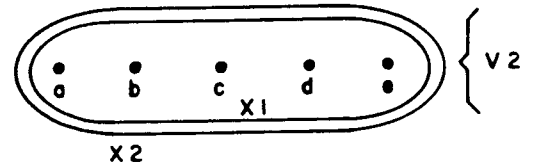
Inicialmente: $I = \emptyset, |I| = 0$

1º Passo:

$I = V_1 = \emptyset$

$V_2 = \{a, b, c, d, e\}$

$X_1 = X_2 = \{a, b, c, d, e\}$



Qualquer elemento de V_2 pode ser agregado a I . Assim, escolhe-se, por exemplo, $\{d\}$.

2º Passo:

$I = V_1 = \{d\}$

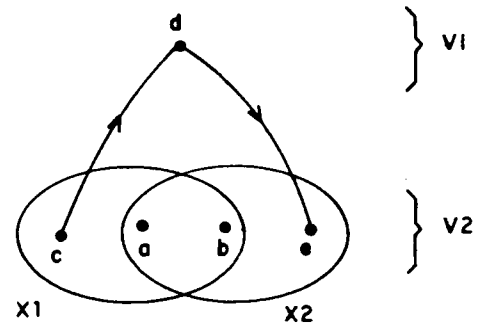
$V_2 = \{a, b, c, e\}$

$X_1 = \{a, b, c\}$

$X_2 = \{a, b, e\}$

$U_{\min} = \{a\}, \{b\}$

Escolhe-se $\{b\}$, então $I \Delta U_{\min} = \{b, d\}$.



3º Passo:

$I = V_1 = \{b, d\}$

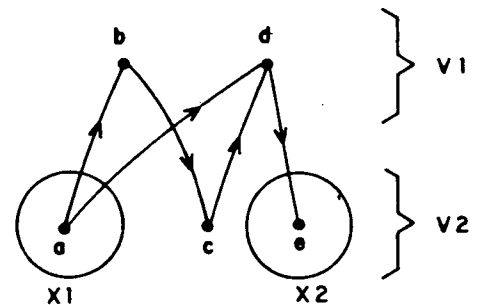
$V_2 = \{a, c, e\}$

$X_1 = \{a\}$

$X_2 = \{e\}$

$U_{\min} = \{a, d, e\}$

$I \Delta U_{\min} = \{a, b, e\}$



4º Passo:

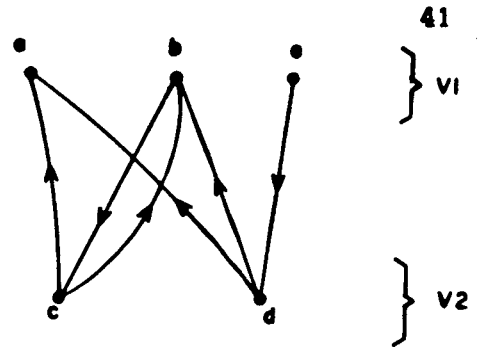
$I = V1 = \{a, b, e\}$

$V2 = \{c, d\}$

$X1 = \emptyset$

$X2 = \emptyset$

$U_{\min} = \emptyset$



O conjunto $I = \{a, b, e\}$ é uma interseção ($M1 \cap M2$) de máxima cardinalidade.

Este método será utilizado no capítulo IV para a análise da observabilidade topológica de planos de medição sujeitos à Estimação de Estados de Sistemas de Potência.

3.8 Método para Determinação de Elementos Críticos de Interseção de Matróides

3.8.1 Introdução

Seja a interseção I de dois matróides $M1=(S, \mathcal{I}1)$ e $M2=(S, \mathcal{I}2)$. Diz-se que um elemento e de I é crítico se, após se remover e de S , não for possível se encontrar outra interseção I' de $M1$ e $M2$ com a mesma cardinalidade de I .

Sabe-se da seção anterior que, para a determinação de I , o grafo bipartido auxiliar $G_{ba}(V1, V2)$ é repetidamente construído até que não seja mais possível se encontrar seqüências de aumento. Contudo, pode-se encontrar seqüências de troca cuja cardinalidade é um número par, ou seja, o número de elementos adicionados e subtraídos a I é o mesmo. Deste modo, está-se apenas remanejando os elementos de I , sem que isto afete sua cardinalidade.

Assim, é possível concluir que os elementos de I que não fazem parte de seqüências de troca são elementos críticos.

3.8.2 Método para Determinação de Elementos Críticos

Este método se baseia nos fundamentos já enunciados na introdução desta seção.

De posse da interseção I de dois matróides quaisquer $M1=(S, \mathcal{I}1)$ e $M2=(S, \mathcal{I}2)$, constrói-se o grafo bipartido auxiliar $G_{ba}(V1, V2)$ como já descrito na subseção 3.7.3, ou seja:

$$V1 = \{v1 : v1 \in I\};$$

$$V2 = \{v2 : v2 \notin I\},$$

sendo que

$$V2 = X0 \cup X1 \cup X2,$$

onde:

$$X1 = \{x1 : x1 \notin I, I + x1 \in J1\}$$

$$X2 = \{x2 : x2 \notin I, I + x2 \in J2\}$$

$$X0 = \{x0 : x0 \in V2 \setminus (X1 \cup X2)\}$$

As arestas de G_{Ba} são assim formadas:

- Se $x \in V2$, $I + x \notin J1$ e $y \in C1(I, x)$, criar aresta $y \rightarrow x$ em $G_{Ba}(V1, V2)$;

- Se $x \in V2$, $I + x \notin J2$ e $y \in C2(I, x)$, criar aresta $x \rightarrow y$ em $G_{Ba}(V1, V2)$.

Conforme a construção de G_{Ba} , as seqüências de troca são direcionadas de $X1$ para $V1$ e de $V1$ para $X2$. Para compreender este direcionamento, considere a figura 3.7.1 da seção anterior.

Se o primeiro elemento de uma seqüência de troca pertencer a $V2$ (e portanto não pertencer a I), este elemento obrigatoriamente deverá estar contido em $X1$. Da figura 3.7.1 observa-se que os únicos vértices fonte de $V2$ são os integrantes dos conjuntos $X1$ e $X0$. Se os elementos correspondentes aos vértices de $X0$ são adicionados a I , então I não se mantém independente nem em $M1$ nem em $M2$. Assim, ao se submeter uma seqüência de troca iniciada por um elemento de $X0$ ao conjunto I , este se torna dependente em $M1$ ou em $M2$. Em contrapartida, se a seqüência de troca inicia-se por um elemento de $X1$, o qual já é independente em $M1$ se a I for adicionado, obtém-se ao final da diferença simétrica entre I e a seqüência de troca um conjunto I independente em ambos os matróides.

Agora, se o primeiro elemento de uma seqüência de troca pertencer a $V1$, isto é, se for um elemento de I , então o último elemento da seqüência deve ser um elemento de $X2$. Também da figura 3.7.1 observa-se que os vértices sumidouros de $V2$ estão contidos ou em $X2$ ou em $X0$. Como foi visto no parágrafo anterior, uma seqüência de troca direcionada de $V2$ para $V1$ deve possuir o primeiro elemento independente em um dos matróides. Pelo mesmo motivo, para o direcionamento de $V1$ para $V2$ uma seqüência de troca deve possuir o último elemento independente em um dos matróides, o que equivale ao caminho $V1$ para $X2$.

Após todas as seqüências de troca terem sido encontradas, os

elementos de I nelas contidos são armazenados no conjunto H .

Os elementos de H são elementos não-críticos. Estes, sendo integrantes de seqüências de troca, são passíveis de substituição por elementos de V_2 , de modo a manter a cardinalidade de I e sua independência com relação a ambos os matróides. Já os elementos de I não pertencentes a H são elementos críticos, pois nenhum outro elemento os substituem. Resumindo:

$$\{\text{elementos críticos}\} = V_1 \setminus H \quad (1)$$

Este método será utilizado no capítulo V para a determinação de medidas críticas existentes em planos de medição submetidos à Estimação de Estados de Sistemas Elétricos de Potência.

Exemplo de aplicação do método para determinação de elementos críticos em interseção de matróides.

Considere os matróides $M_1 = (S, J_1)$ e $M_2 = (S, J_2)$ cuja interseção $I = \{a, c, e\}$.

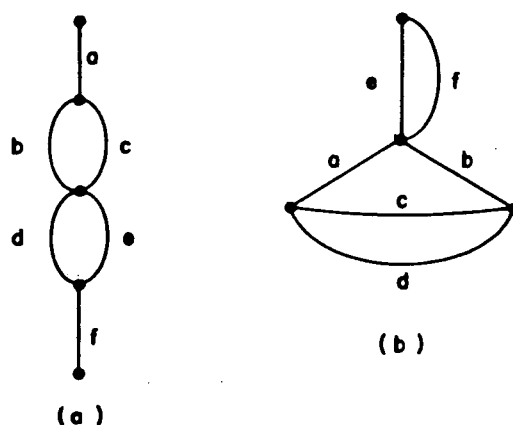


Figura 3.8.1 - (a) $M_1 = (S, J_1)$; (b) $M_2 = (S, J_2)$

O grafo bipartido auxiliar $G_{ba}(V_1, V_2)$ correspondente é mostrado na figura 3.8.2.

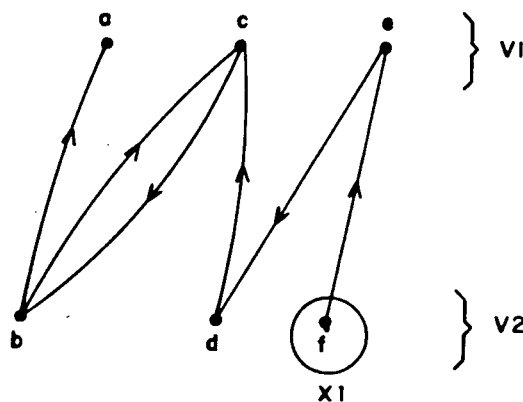


Figura 3.8.2 - $G_{ba}(V_1, V_2)$

Ou seja:

$$I = V1 = \{a, c, e\},$$

$$V2 = \{b, d, f\},$$

$$X1 = \{f\},$$

$$X2 = \emptyset$$

A sequência de troca T encontrada é:

$$T = \{f, e, d, c, b, a\}$$

sendo que

$$H = \{e, c, a\}$$

então:

$$\{\text{elementos críticos}\} = V1 \setminus H = \emptyset$$

Desta expressão conclui-se que não existem elementos críticos em S .

Uma particularidade do grafo G_{ba} acima consiste no ciclo formado pelas arestas paralelas b e c , que evidencia uma possibilidade de permuta de uma destas arestas pela outra.

Uma restrição deste método, a qual não o torna geral, é a sua incapacidade em determinar corretamente os elementos críticos quando tais ciclos não estão incluídos nas sequências de troca. Isto acontece, por exemplo, quando I é uma base para ambos os matróides. Nesta circunstância, já que $X1$ e $X2$ são conjuntos vazios, não existem caminhos que liguem $V1$ a $V2$ ou vice-versa, e todos os elementos da interseção são intitulados como críticos. Contudo, este resultado é falso caso o grafo $G_{ba}(V1, V2)$ contenha os ciclos mencionados. Para melhor compreensão, considere o contra-exemplo a seguir:

Sejam os matróides $M1 = (S, \mathcal{I}1)$ e $M2 = (S, \mathcal{I}2)$, cuja interseção $I = \{a, b, d, e\}$.

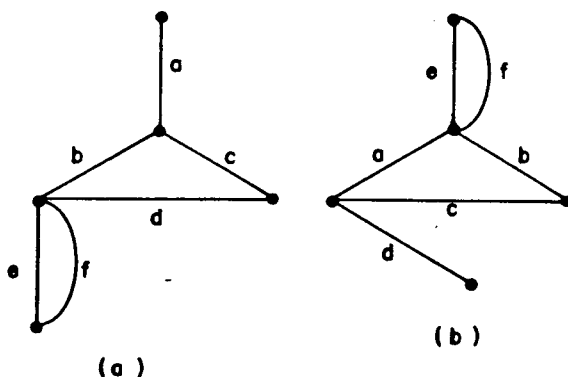


Figura 3.8.3 (a) $M1 = (S, \mathcal{I}1)$, (b) $M2 = (S, \mathcal{I}2)$

O grafo bipartido auxiliar $G_{Ba}(V_1, V_2)$ correspondente é o seguinte:

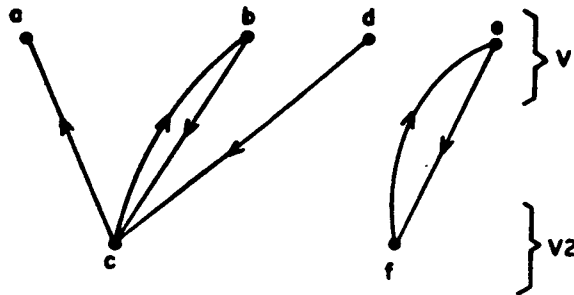


Figura 3.8.4 - Grafo Bipartido Auxiliar $G_{Ba}(V_1, V_2)$

Ou seja:

$$V_1 = I = \{a, b, d, e\},$$

$$V_2 = \{c, f\},$$

$$X_1 = \emptyset,$$

$$X_2 = \emptyset,$$

Não existem seqüências de troca, então pelo método, todos os elementos de I são críticos. Mas, existem os seguintes ciclos:

$$\text{Ciclo 1} = \{e, f\}, \text{ implicando em } I' = \{a, b, d, f\},$$

e

$$\text{Ciclo 2} = \{b, c\}, \text{ implicando em } I' = \{a, c, d, e\}$$

Observa-se que há possibilidade de permuta entre os elementos $e-f$ e entre $b-c$, concluindo-se que os elementos "e" e "c" não são críticos. Assim, ao invés de todos os elementos de $I = \{a, b, d, e\}$ serem elementos críticos (conforme método exposto), na verdade o são apenas os elementos "a" e "d".

$$\{\text{elementos críticos}\} = \{a, d\}$$

Apesar dessa ressalva, o método discutido é perfeitamente aplicável à questão da determinação de medidas críticas em Sistemas Elétricos de Potência, como será visto no capítulo V.

CAPÍTULO IV

APLICAÇÃO DE TEORIA DE MATRÓIDES À ANÁLISE DE OBSERVABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

4.1 Introdução

Segundo os fundamentos da observabilidade topológica, sabe-se que um plano de medição M é observável, se é possível encontrar uma árvore geradora observável do grafo da rede do sistema com respeito a M .

Este capítulo versa sobre a determinação da árvore geradora observável (caso ela exista) de um grafo de medição montado a partir do plano de medição sujeito à Estimação de Estados. Para tanto, é utilizado o método para determinação de interseção de matróides [23] descrito no capítulo anterior.

O capítulo está organizado do seguinte modo. A seção 4.2 apresenta a fundamentação do problema da observabilidade topológica. Em seguida, a seção 4.3 mostra a utilização do método baseado em interseção de matróides para a análise da observabilidade. Finalmente, na seção 4.4, descreve-se a implementação do algoritmo em pauta.

4.2 Fundamentação do Problema

A questão de se determinar a árvore geradora observável é tratada em termos do grafo de medição ZM de um plano de medição M , o qual contém todas as arestas possíveis que possam ser associadas às medidas de M .

Portanto, sobre este grafo se investiga a existência de uma árvore geradora, com a restrição de que esta não poderá conter mais do que uma aresta associada a uma dada medida, isto é, se investiga a existência de uma árvore geradora observável.

Esta restrição implica em uma seleção quanto às arestas que formam a árvore geradora. Para considerá-la, faz-se uso de um matróide $M_1 = (E, \mathcal{I}_1)$, onde E compreende o conjunto de arestas do grafo de medição. Para que um conjunto de arestas em E seja independente em M_1 , isto é, pertença a \mathcal{I}_1 , é preciso que cada um de seus elementos esteja associado a uma medida diferente.

Este matróide $M_1 = (E, \mathcal{J}_1)$ é definido em termos de um grafo bipartido de medição $ZM_b(A, B)$ (ver seção 3.4.3), o qual apresenta como coleção \mathcal{J}_1 de conjuntos independentes todos os seus possíveis emparelhamentos. Estes emparelhamentos são, na verdade, transversais parciais em que cada elemento está associado a uma única medida do conjunto A de $ZM_b(A, B)$, satisfazendo portanto à restrição já mencionada.

Conforme a definição de matróide transversal (ver seção 3.4.3), verifica-se que $M_1 = (E, \mathcal{J}_1)$ é um matróide transversal.

Através do uso deste matróide transversal $M_1 = (E, \mathcal{J}_1)$, procura-se portanto equacionar a restrição existente no que diz respeito às arestas que irão formar a árvore geradora.

Outro matróide $M_2 = (E, \mathcal{J}_2)$, aqui utilizado, é o matróide do grafo de medição, que também é definido sobre E (conjunto de arestas de ZM); e cujo \mathcal{J}_2 é a coleção de todas as árvores de ZM (ver seção 3.4.2).

O problema propriamente dito de se encontrar a árvore geradora satisfazendo a restrição mencionada, isto é, a árvore geradora observável, é resolvido através da interseção dos matróides $M_1 = (E, \mathcal{J}_1)$ e $M_2 = (E, \mathcal{J}_2)$. Ambos os matróides estão definidos sobre o mesmo conjunto E de arestas do grafo de medição.

A interseção I de M_1 e M_2 é um conjunto de elementos que pertencem a E e que é independente tanto em M_1 quanto em M_2 , isto é, cada um de seus elementos estão associados a medidas diferentes e os mesmos formam uma árvore em ZM .

Se I for também uma base de M_2 , ou seja, se I for uma árvore geradora de ZM , então o plano de medição em análise é observável, pois obteve-se uma árvore geradora observável. Se I não for uma base, então o plano de medição não é observável e a interseção I é uma floresta observável maximal.

Para se determinar se I é uma base de M_2 , ou seja, se o conjunto de elementos de I forma uma árvore geradora, verifica-se se a cardinalidade de I é igual a $(N - 1)$, onde N é igual ao número de barras da rede elétrica.

4.3 Utilização do Método para Determinação de Interseção de Matróides na Análise da Observabilidade

Inicia-se o algoritmo de interseção de matróides a partir de um dado I independente tanto em M_1 quanto em M_2 , e passa-se à construção de um

grafo bipartido auxiliar $Z_{ba}(V_1, V_2)$, conforme já descrito na seção 3.7.3. Contudo, este é agora definido em termos de $M_1 = (E, J_1)$ e $M_2 = (E, J_2)$, onde:

$$V_1 = \{v_1 : v_1 \in I\},$$

$$V_2 = \{v_2 : v_2 \notin I\},$$

$X_1 = \{x_1 : x_1 \in I, I + x_1 \in J_1\}$, ou seja, X_1 é o conjunto de todas as arestas cujas medidas e elas associadas não estão integrando I ,

$X_2 = \{x_2 : x_2 \in I, I + x_2 \in J_2\}$, ou seja, X_2 é o conjunto de arestas que, ao serem adicionadas ao grafo Z_M , não formam ciclos.

O conjunto $(X_1 \cup X_2) \subseteq V_2$.

O passo seguinte consiste na formação das arestas direcionadas de $Z_{ba}(V_1, V_2)$:

- cada vértice $x \in V_1$ é conectado ao vértice $y \in V_2$ que esteja associado à mesma medida de x , ou seja, cria-se a aresta $x \rightarrow y$ em $Z_{ba}(V_1, V_2)$.

- cada vértice $y \in (V_2 \setminus X_2)$ é conectado aos vértices $x \in V_1$, os quais correspondem às arestas contidas no único circuito formado em I pela adição de y a I , ou seja, criam-se as arestas $y \rightarrow x$ em $Z_{ba}(V_1, V_2)$.

Com o grafo $Z_{ba}(V_1, V_2)$ assim construído, busca-se um caminho Umínimo de X_1 para X_2 . Se Umínimo existe, faz-se a diferença simétrica entre I e Umín e obtém-se o novo I' .

$$I' = I \Delta \text{Umín}$$

Após esta operação, a cardinalidade de I passa a ser incrementada de uma unidade e, de posse do novo I , reconstrói-se o grafo $Z_{ba}(V_1, V_2)$. Este processo é repetido até que não seja mais encontrado um Umínimo, significando com isto que a interseção de cardinalidade máxima $k_{\text{máx}}$ foi encontrada.

Se $k_{\text{máx}}$ for igual a $(N - 1)$, então I é uma árvore geradora observável, ou seja, o plano de medição é topologicamente observável. Se não o for, significa que I é uma floresta observável maximal de um plano de medição não-observável.

Considere a aplicação deste algoritmo aos matróides $M_1 = (E, J_1)$ e $M_2 = (E, J_2)$, cujos grafos bipartido de medição $Z_{Mb}(A, B)$ e grafo de medição Z_M são exemplificados pelas figuras 4.3.1 e 4.3.2:

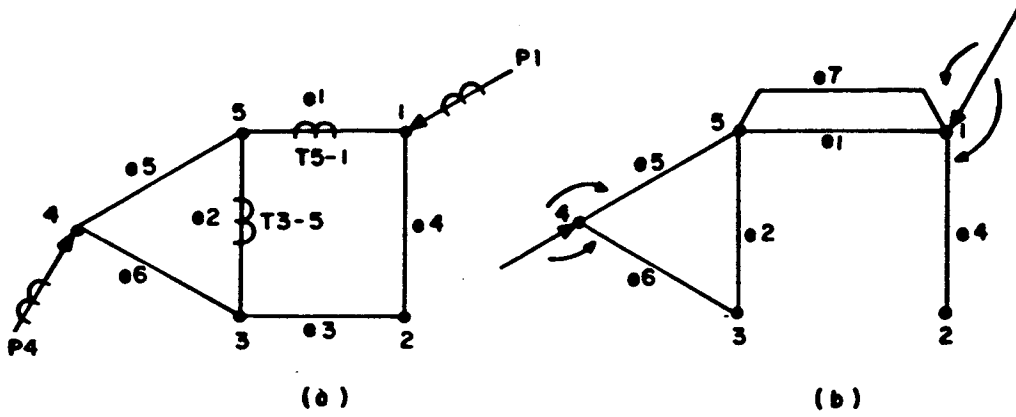


Figura 4.3.1 - (a) Plano de Medição M,
- (b) Grafo de Medição ZM

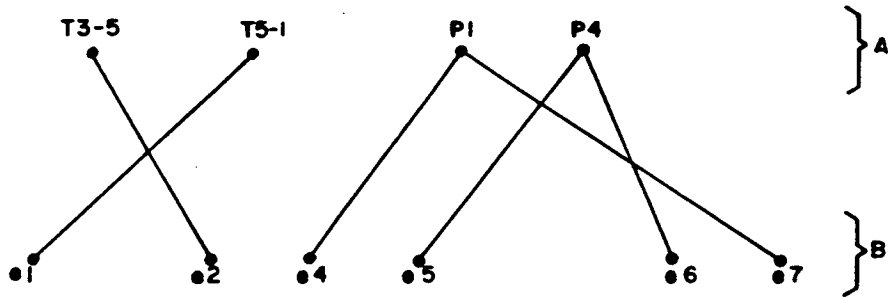


Figura 4.3.2 - Grafo Bipartido de Medição ZMb(A,B)

Seja:

$$I = \{e_5, e_7\}, |I| = 2$$

Então o subgrafo formado pelos elementos de I e o correspondente grafo bipartido auxiliar Zba(V1, V2) são apresentados na figura 4.3.3.

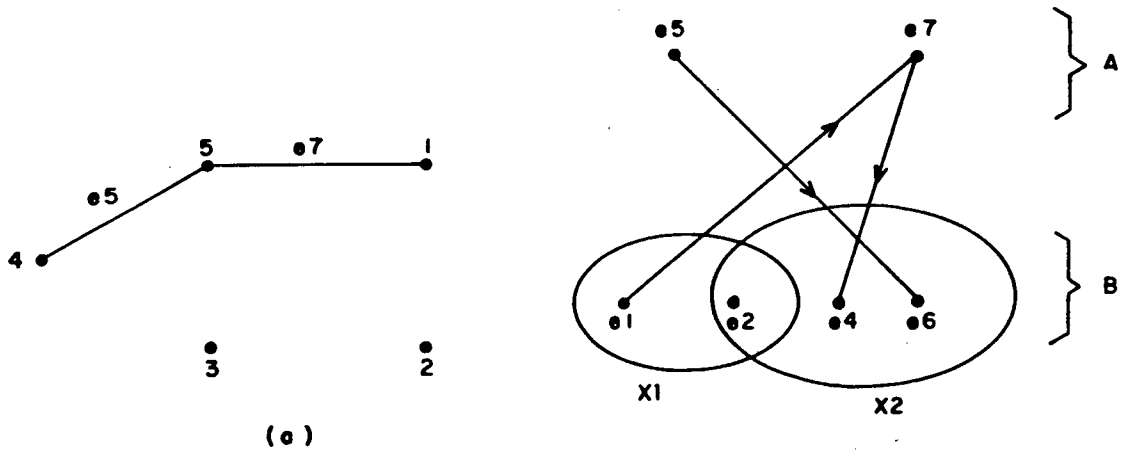


Figura 4.3.3 - (a) Subgrafo formado por elementos de I,
- (b) Grafo bipartido auxiliar Zba(V1, V2) correspondente a I

Da figura 4.3.3 (b), observa-se que, neste caso particular, $U_{\min} = \{e_2\}$, isto é, o caminho mínimo reduz-se a um vértice.

Então $I' = I \Delta U_{\min} = \{e_2, e_5, e_7\}$, sendo que $|I'| = 3$.

Reconstrói-se o grafo bipartido auxiliar $Z_{ba}(V_1, V_2)$ com relação ao novo I' , o que corresponde aos grafos da figura 4.3.4:

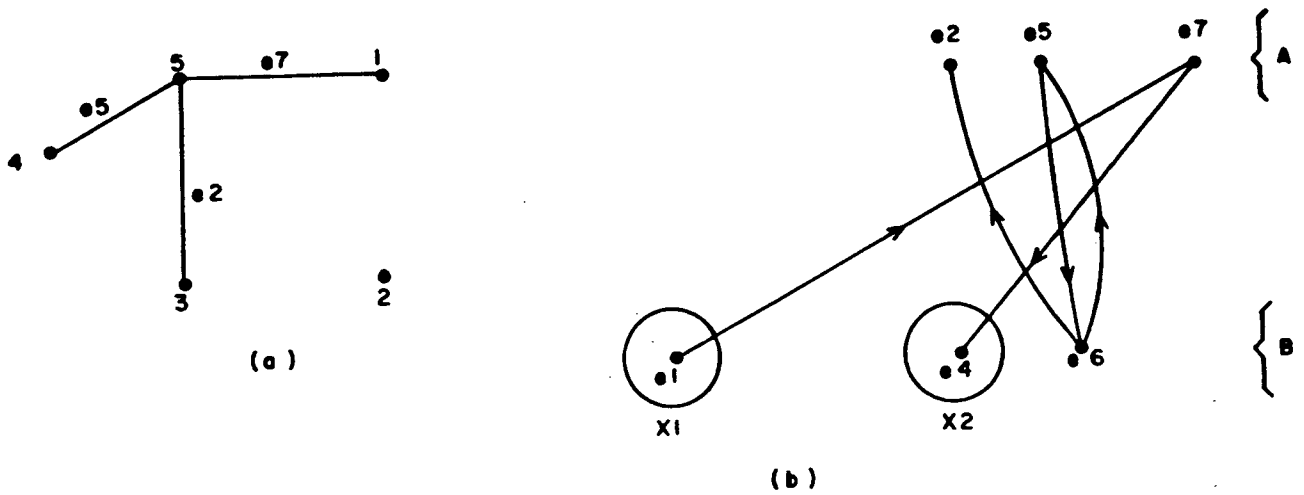


Figura 4.3.4 -(a) Subgrafo formado por elementos de I' ,

(b) Grafo bipartido auxiliar $Z_{ba}(V_1, V_2)$ correspondente a I'

Da figura 4.3.4 (b), observa-se que o caminho U_{\min} que interliga X_1 a X_2 é $U_{\min} = \{e_1, e_7, e_4\}$.

Então $I'' = I' \Delta U_{\min} = \{e_1, e_2, e_4, e_5\}$, onde $|I''| = |N - 1| = 4$. Portanto, I'' é uma árvore geradora observável, conforme indicado na figura 4.3.5.

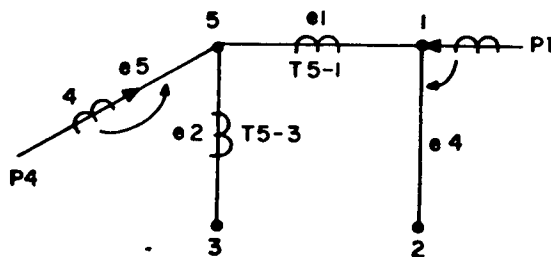


Figura 4.2.5 Árvore Geradora Observável

4.4. Implementação do Método para Análise da Observabilidade Topológica

4.4.1. Considerações Gerais

Antes de ser descrita a implementação do algoritmo de interseção de matróides para o problema da observabilidade topológica, é conveniente que se apresente a maneira como são tratadas as medidas ativas e reativas de um plano de medição.

Os métodos para determinação da observabilidade apresentados pela literatura são aplicados uma única vez para a conclusão da observabilidade P- δ , Q-V, já que as medidas ativas e reativas são geralmente tomadas aos pares.

Neste trabalho a questão da observabilidade P- δ e Q-V é tratada separadamente.

4.4.2 Observabilidade P- δ e Q-V

Tendo em vista o desacoplamento entre a parte ativa P- δ e a parte reativa Q-V do plano de medição é possível tratar a observabilidade pela análise separada do plano P- δ e Q-V. O plano de medição P- δ é composto por medidas de fluxo e injeção de potência ativa, enquanto que o plano Q-V é composto por medidas de fluxo e injeção de potência reativa e medidas de módulo de tensão [12].

Cada um destes planos são submetidos separadamente ao algoritmo de interseção de matróides, isto é, à rotina que determina a observabilidade topológica. Se tanto para a parte P- δ quanto para a parte Q-V existir uma árvore geradora observável, então o plano de medição global é topologicamente observável.

A presença das medidas dos módulos de tensão dentro do subconjunto das medidas reativas introduz uma assimetria entre os dois sub-problemas P- δ e Q-V. Para que se possa considerar similarmente os dois subconjuntos de medidas, utiliza-se o tratamento proposto em [4], onde cada medida de tensão é considerada equivalente a uma medida de fluxo reativo de susceptância unitária, que liga a barra em que é feita a medida com um nó adicional fictício.

Este tratamento é eficiente para a análise da observabilidade, o

qual possibilita a simulação das medidas Q-V do mesmo modo que são simuladas as medidas P- δ . Portanto, a sequência de processamento é a mostrada no fluxograma da figura 4.4.1.

4.4.3 Algoritmo de Interseção de Matróides Aplicado a Análise de Observabilidade Topológica

O fluxograma da figura 4.4.2 apresenta a implementação do algoritmo de interseção dos matróides $M_1 = (E, J_1)$ e $M_2 = (E, J_2)$, matróide transversal do grafo bipartido de medição e matróide do grafo de medição, respectivamente. A determinação desta interseção visa a análise da observabilidade proposta por [3].

Primeiramente, deve-se observar que cada medida de fluxo está associada a uma única aresta do grafo de medição. Não há, portanto, risco de se construir uma árvore geradora onde haja duas arestas associadas a uma mesma medida de fluxo. Logo, as medidas de fluxo por si só satisfazem a restrição imposta sobre as arestas de uma floresta observável, não sendo preciso incorporá-las ao grafo bipartido de medição.

Deste modo, é possível dividir o método em duas etapas: processamento das medidas de fluxo e processamento das medidas de injeção.

O processamento das medidas de fluxo consiste na busca de uma floresta observável F no subgrafo de ZM formado apenas por arestas de fluxo. Se F for uma árvore geradora, conclui-se que o plano de medição é topologicamente observável, não havendo assim a necessidade do processamento das medidas de injeção.

Em caso contrário, passa-se às medidas de injeção com o intuito de se encontrar aquelas que complementam F e assim formam a árvore geradora observável, caso ela exista. Para tanto, lança-se mão do método de interseção dos matróides $M_1 = (E, J_1)$ e $M_2 = (E, J_2)$ definidos na seção 4.3.

A floresta F composta por arestas de fluxo passa a ser o conjunto I inicial, isto é, o ponto de partida para o método de interseção.

O primeiro passo, nesta segunda etapa de processamento, consiste em montar o grafo bipartido auxiliar $Zba(V_1, V_2)$. Antes disso, porém toma-se o cuidado de não incorporar ao conjunto V_2 de $Zba(V_1, V_2)$ as arestas de fluxo que não são utilizadas em F e as arestas de injeção que estão em paralelo com arestas de fluxo. É fácil concluir que estas arestas não se qualificam a fazer parte da árvore geradora observável.

Os vértices de $Z_{ba}(V_1, V_2)$ são então:

V_1 = conjunto de vértices relacionados às arestas pertencentes a F

V_2 = conjunto de vértices relacionados às arestas de injeção (que não estão em paralelo com arestas de fluxo).

Estando definidos os vértices de $Z_{ba}(V_1, V_2)$, passa-se à formação de suas arestas e definição dos subconjuntos X_1 e X_2 de V_2 .

Cabe aqui relembrar a natureza dos conjuntos X_1 e X_2 .

$X_1 = \{x_1 : F + x_1 \in J_1\}$, ou seja, conjunto de arestas de injeção, cujas medidas correspondentes não figuram em F , isto é, que ao serem adicionados a F mantêm independência em $M_2 = (E, J_2)$.

$X_2 = \{x_2 : F + x_2 \in J_2\}$, ou seja, conjunto de arestas de injeção que ao serem adicionadas a F , não formam ciclos, isto é, mantêm independência em $M_2 = (E, J_2)$.

Pelo fluxograma da figura 4.4.2, observa-se que a partir do bloco 8, analisa-se cada um dos vértices pertencentes a V_2 , isto é, dos vértices que não pertencem a F . A análise consiste em caracterizar cada um dos vértices como pertencente a X_1 ou X_2 e em formar a aresta correspondente em $Z_{ba}(V_1, V_2)$.

Então, considerando a aresta e_1 que corresponde ao vértice y pertencente a V_2 , verifica-se se a sua inclusão em F forma um ciclo, ou seja, verifica-se se y faz ou não parte do conjunto X_2 . Caso o ciclo exista, i.é., caso a inclusão de e_1 em F não a mantenha independente em $M_2 = (E, J_2)$, cria-se uma aresta em $Z_{ba}(V_1, V_2)$ de $y \Rightarrow x$ para cada x , onde x corresponde as arestas pertencentes ao ciclo formado em F pela inclusão de e_1 . Se porventura não existe ciclo, y passa a integrar X_2 .

No bloco 15, verifica-se se a medida relacionada à aresta e_1 já faz parte de F , ou seja, verifica-se se a inclusão desta aresta e_1 em F a mantêm independente em $M_1 = (E, J_1)$. Se já existe a medida relacionada a e_1 em F , forma-se então a aresta $x \Rightarrow y$, onde x é o vértice de V_1 cuja aresta pertence a F e que está associada a mesma medida da aresta e_1 relacionada a y . Se não existir em F nenhuma medida associada a e_1 , então y passa a integrar X_1 . Porém, se y estiver contida também em X_2 , adiciona-se esta aresta a F (bloco 18), pois $F + e_1$ é tanto independente em $M_1 = (E, J_1)$ quanto em $M_2 = (E, J_2)$.

A propósito, este é um caso particular onde y é agregado a F antes mesmo de se ter completado a construção de $Z_{ba}(V_1, V_2)$. Deve-se observar aqui que sendo y integrante tanto de X_1 quanto de X_2 , o menor

caminho entre X_1 e X_2 é o próprio elemento y (ver exemplo da seção anterior).

Ao se processar a última aresta e_1 de V_2 , obtém-se o grafo $Z_{ba}(V_1, V_2)$, sendo então possível a procura do caminho Uminimo de X_1 para X_2 .

Se o caminho Uminimo não existir, conclui-se que o plano de medição é não-observável, pois não existe árvore geradora observável.

Em caso contrário, os vértices de V_1 que pertencem a Uminimo são subtraídos de F , enquanto que os que pertencem a V_2 são adicionados, de modo a incrementar de uma unidade a cardinalidade de F .

Testa-se, então, se a nova floresta F é uma árvore geradora observável, isto é, se é uma base para $M_2 = (E, J_2)$. Se não o for, reconstrói-se $Z_{ba}(V_1, V_2)$ para dar prosseguimento ao método. Se, ao contrário, F é uma árvore geradora observável, conclui-se que o plano de medição em análise é topologicamente observável.

Quando não for encontrada Umin de X_1 para X_2 , sem que seja uma base de $M_2 = (E, J_2)$, significa que F é uma floresta observável maximal. Já que não existe árvore geradora observável, conclui-se que o plano de medição em análise não é topologicamente observável.

A versão do algoritmo apresentada na figura 4.4.1 preconiza que, após a cada incremento de cardinalidade de F , o grafo bipartido auxiliar seja reconstruído. É possível, contudo, modificar o algoritmo para que, ao invés desta reconstrução repetida, o grafo $Z_{ba}(V_1, V_2)$ seja modificado adequadamente após cada incremento em F . Isto propicia uma drástica redução no número de operações ao final do processo. A versão do método assim tratado encontra-se em [5], onde a reconfiguração de $Z_{ba}(V_1, V_2)$ é feita a partir da atualização do conjunto V_1, X_1 e X_2 .

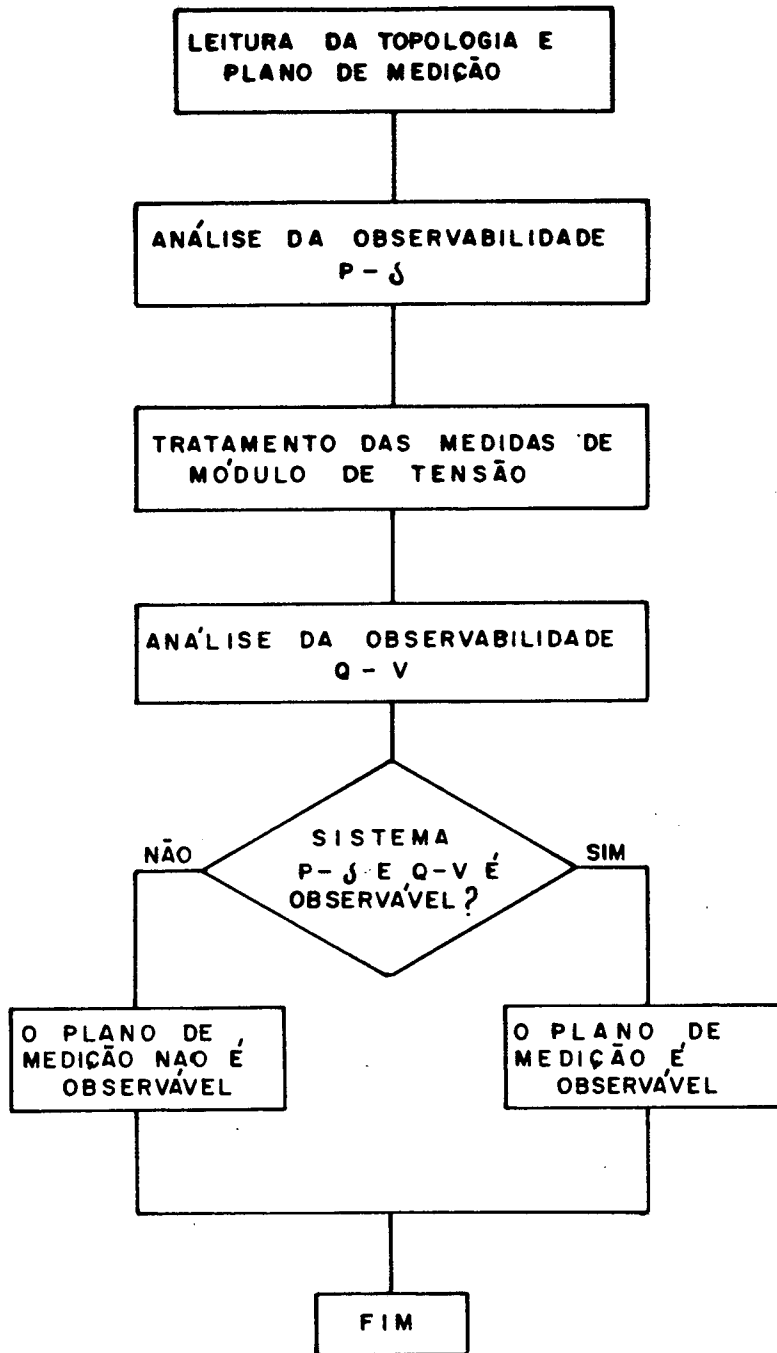


Figura 4.4.1 Sequência de processamento considerando-se medidas ativas e reativas

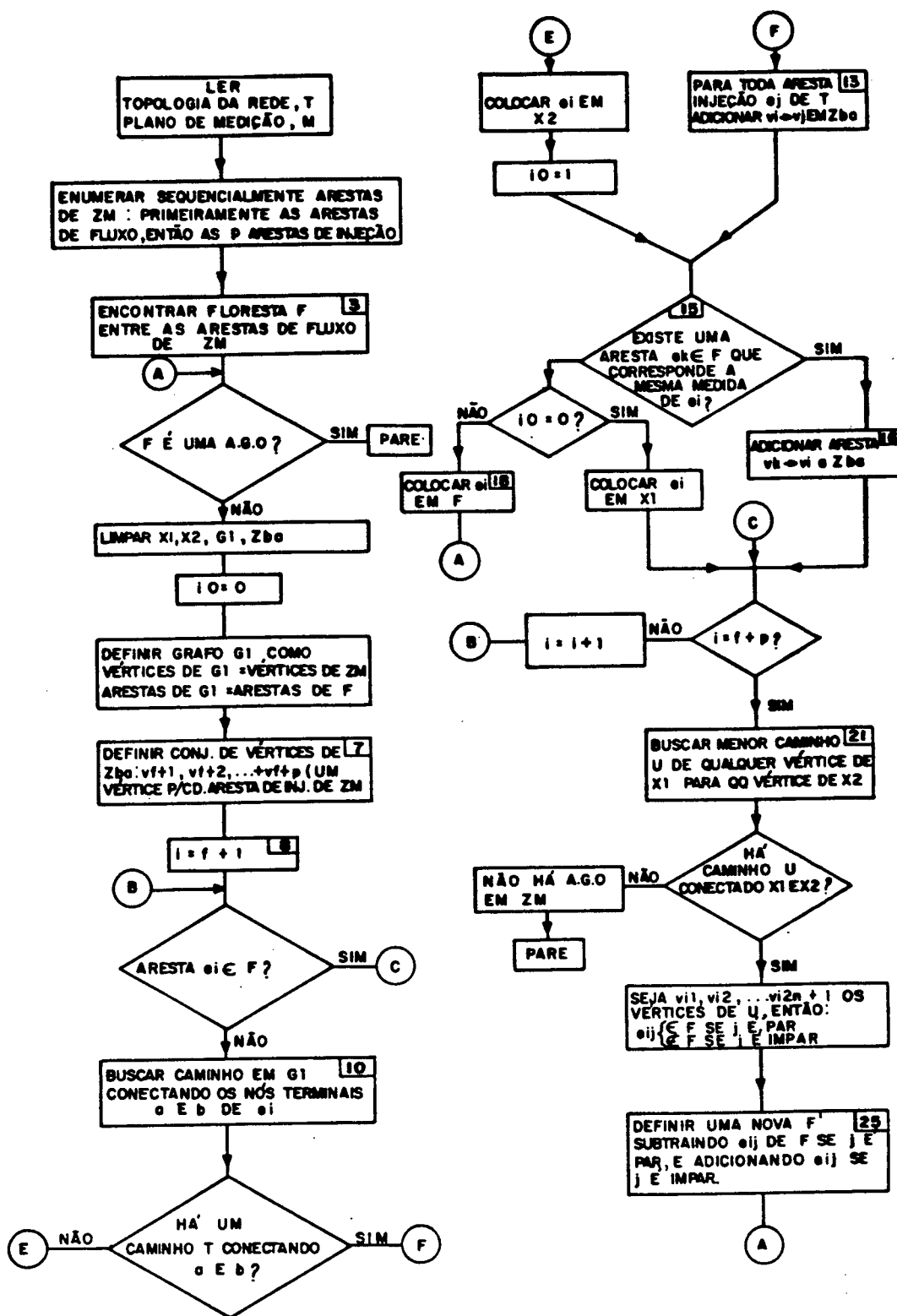


Figura 4.4.2 - Procedimento OBSERV(M, T, F): para determinação de interseção de matrôides na análise de observabilidade topológica

Entradas: Plano de medição, M

Topologia da rede, T

Saída: Floresta observável, F

CAPÍTULO V

DETERMINAÇÃO DE MEDIDAS E CONJUNTOS CRÍTICOS

5.1 Introdução

Este capítulo versa sobre a determinação de medidas e conjuntos críticos em planos de medição sujeitos à Estimação de Estados.

Para tanto, são estudados dois métodos: método enumerativo e método não-enumerativo. O primeiro consiste em análise de cada uma das medidas para a conclusão a respeito de suas criticidades. E, o segundo método trata-se de um algoritmo combinatório, que se utiliza da Teoria de Matróides, ou mais especificamente do método para determinação de elementos críticos em interseção de matróides, descrito no capítulo III. Ambos os métodos são topológicos, pois se utilizam da estrutura do plano de medição e do diagrama da rede elétrica. Portanto, é importante que antes de apresentá-los seja justificada a utilização de métodos desta natureza, o que é objetivo da seção 5.2 deste capítulo.

A literatura a respeito da determinação de medidas e conjuntos críticos é escassa, e por necessidade de se obter um método de confrontação eficaz para validação dos resultados do método combinatório, são realizadas alterações no método enumerativo proposto em [10], a título de melhorar sua eficiência computacional e operacional.

Estas melhorias são obtidas através do uso criterioso de características inerentes aos elementos dos conjuntos críticos, tal como a propriedade de reciprocidade, e utilização de procedimentos heurísticos tais como a atualização do grafo de medição externamente a rotina de observabilidade (evitando assim a sua construção a cada medida processada) e análise preliminar do grafo de medição, o que em certos casos possibilita a determinação imediata da observabilidade. Outras melhorias dizem respeito ao tratamento de mais de uma medida de fluxo numa mesma linha de transmissão.

Após estas alterações (seção 5.3), têm-se em mãos um método apto a ser confrontado com o método não-enumerativo, descrito na seção 5.4.

Cabe salientar que primeiramente é suposto que as medidas ativas e reativas existentes no plano de medição são tomadas aos pares, tendo uma medida de módulo de tensão na barra de referência. Contudo, a última seção é reservada ao estudo da determinação de medidas e conjuntos críticos relativos à parte P- δ e Q-V separadamente. Neste caso, os dois métodos estudados neste capítulo são aplicados duas vezes, isto é, são aplicadas à parte ativa e reativa e um estudo adicional a respeito da criticidade das medidas de módulo de tensão é apresentado.

5.2 Utilização do Método Topológico

Sabe-se da literatura [6], [7], que medidas críticas portadoras de erros grosseiros são não-detectáveis, pois os resíduos de estimação associadas a elas são necessariamente nulos. Por outro lado, qualquer medida integrante de um conjunto crítico portadora de erro é não-identificável, embora seja detectável, pois os resíduos normalizados associados às medidas de um mesmo conjunto crítico são iguais entre si.

Assim, a identificação de medidas e conjuntos críticos poderia ser realizada tendo por base as propriedades numéricas associadas a estas medidas. No entanto, métodos desta natureza apresentam restrições inerentes ao fato de se trabalhar em ponto flutuante, dificultando deste modo sua utilização.

Por exemplo, para a consideração dos resíduos nulos é necessário que se estabeleça uma tolerância adequada abaixo do qual se considere o valor calculado em computador de um resíduo como teoricamente igual a zero. Já para a detecção de módulos dos resíduos normalizados que teoricamente são iguais entre si, deve-se levar em consideração o fato de seus valores calculados raramente serem de fato iguais, o que dificulta qualquer comparação numérica entre eles.

Estes obstáculos levam à utilização de método topológico para determinação de medidas e conjuntos críticos, os quais não requerem comparação de quantidades em ponto flutuante e são invariantes com as condições de carga do sistema.

5.3 Método Enumerativo para Determinação de Medidas e Conjuntos Críticos

5.3.1 Considerações Gerais

Esta seção apresenta um método enumerativo para a determinação de medidas e conjuntos críticos, o qual se baseia em algoritmo de análise de observabilidade previamente descrito no capítulo IV. É objetivo também desta seção descrever alterações neste método que visam a obtenção de um algoritmo computacionalmente eficiente e aplicável a qualquer situação realística no contexto da operação de Sistemas Elétricos de Potência.

5.3.2. Descrição do Método Enumerativo Para Determinação de Medidas e Conjuntos Críticos

Uma medida é crítica se, quando suprimida do conjunto de medidas M , torna o sistema não-observável [10].

Baseado nesta definição, o método enumerativo aqui estudado propõe a retirada de cada uma das m medida do plano, sendo que para a verificação da manutenção ou não da observabilidade é utilizado o algoritmo de determinação de observabilidade topológica descrito no capítulo IV e que aqui será referenciado por procedimento OBSERV.

Ou seja, o algoritmo para determinação de medidas críticas propõe a retirada e posterior re-inserção de cada medida para verificação da existência ou não da árvore geradora observável, ou melhor, para verificação da observabilidade topológica. Assim, se for retirada uma medida do plano de medição e este se tornar não-observável, então a medida em questão é uma medida crítica, isto é, uma medida 0-crítica.

Evidentemente que a determinação de medidas e conjuntos críticos só é cabível se o plano de medição original é observável. Portanto, toda medida que não tem nenhuma aresta associada a alguma árvore geradora observável do plano não é crítica, pois a sua retirada não ameaça a manutenção da observabilidade topológica [10].

Baseado nestas observações, a busca de medidas críticas vai se restringir ao subconjunto de arestas da árvore geradora observável [10]. Para um sistema de N barras, basta que se simule a supressão de $(N - 1)$ medidas para se determinar as medidas críticas, já que a cardinalidade de uma

árvore geradora é igual a $(N - 1)$.

Na verdade, este método implica na recorrência ao procedimento OBSERV N vezes: uma vez para determinação da observabilidade do plano global M , e $(N - 1)$ vezes para determinação da observabilidade do plano com $(m - 1)$ medidas.

Já o algoritmo para determinação de conjuntos críticos propõe a retirada de todas as medidas do plano de medição, com exceção das medidas críticas. Cada uma das medidas retiradas serão aqui referenciadas como "medidas-pai". A partir da retirada de cada medida-pai, isto é, do plano com $(m - 1)$ medidas, aplica-se o algoritmo para determinação de medidas críticas, sendo que as medidas retiradas a partir de então são designadas como "medidas-filho". Estando determinado o conjunto crítico formado por medidas pai e filhos que se configuram como críticas após a retirada da primeira, insere-se novamente a medida-pai, passando-se então para a medida subsequente.

As medidas críticas detectadas pelo método para determinação de medidas críticas não devem ser incluídas ao subconjunto de medidas-pai, pois uma medida crítica não pode fazer parte de nenhum conjunto crítico [10].

Deste modo, caracteriza-se um conjunto crítico a partir das medidas-filho que se tornam críticas exclusivamente em decorrência da retirada da medida-pai correspondente. Então, as medidas que já eram críticas antes da supressão das medidas-pai não podem integrar um conjunto crítico.

5.3.3 Alterações Implementadas Para Melhoria de Eficiência Computacional em Método Enumerativo Para Determinação de Medidas e Conjuntos Críticos

Com o intuito de se aprimorar o desempenho computacional do método topológico para determinação de medidas e conjuntos críticos, passa-se à descrição de alterações que compreendem a utilização de propriedade e procedimentos heurísticos.

Será referida como propriedade da reciprocidade a propriedade segundo a qual, dado um conjunto crítico cujos elementos são $\{e_1, \dots, e_n\}$, então, por definição, a retirada da medida e_1 torna críticas todas as demais medidas [10]. A reciprocidade entre os elementos deste conjunto é válida pois a retirada de qualquer outro elemento também torna críticos os elementos restantes do conjunto.

Esta propriedade, sendo explorada no algoritmo para determinação de conjuntos críticos, permite a obtenção de tempos de execução muito inferiores

àqueles relatados em [10]. Isto se deve ao fato de se reduzir o número de processamentos de medidas de injeção e fluxo (exceto as críticas) , descartando-se aquelas que formam conjuntos críticos com medidas-pai já analisadas. Além disso, ao invés de se submeter todas as medidas de injeção e fluxo integrantes da árvore geradora observável obtida pela retirada da medida-pai ao algoritmo para determinação de medidas críticas, descartam-se as medidas críticas e as já detectadas como formadoras de conjuntos críticos, pois os seus reprocessamentos são redundantes.

A redução percentual de tempo de execução devido à utilização da propriedade da reciprocidade deve-se à diminuição do número de chamadas do procedimento OBSERV, o qual é tanto menor quanto maior o número e tamanho dos conjuntos críticos existentes no plano de medição.

Outra maneira de se melhorar a eficiência computacional do método proposto é a atualização do grafo de medição utilizada pela análise da observabilidade topológica (proc. OBSERV), evitando assim a sua reconstrução a cada nova recorrência a este procedimento.

O tempo de processamento para montagem apenas do grafo de medição é significativo, a ponto de ratificar a necessidade de reformulação de sua montagem [11]. Ou seja, heurísticamente, atualiza-se um grafo de medição base ZB, que é montado ao se testar a observabilidade global do plano de medição em análise. A partir de ZB, são realizadas modificações em função da medida que está sendo eliminada.

A fim de se explicitar as modificações realizadas para a atualização do grafo ZB, deve-se ter em mente as seguintes definições:

Grau de um vértice v : é o número de vértices adjacentes a v .

Corte de um grafo: é um subconjunto minimal de arestas cuja remoção torna o grafo desconexo.

Aresta de corte de um grafo: aresta cuja remoção do grafo aumenta o número de seus componentes conexos.

Ligação: aresta cuja adição a uma árvore geradora implica na formação de um circuito

Aresta interior: aresta em que ambos os nós terminais possuem grau maior ou igual a dois.

Aresta de fronteira: aresta de corte em que um dos nós terminais possui grau igual a um.

As modificações pertinentes são as seguintes:

1) Quando a medida a ser retirada é de fluxo e está associada a

uma aresta de fronteira tanto na árvore geradora observável quanto no grafo de medição ZB, a atualização de ZB consiste apenas na retirada desta aresta. Se, por outro lado, existem ligações em ZB cujos nós terminais coincidem com um dos nós da aresta de fronteira, esta é substituída pela referida ligação.

2) Quando a medida de fluxo a ser retirada corresponde a uma aresta interior, que é uma aresta de corte de ZB, basta retirá-la do grafo, o que separa o componente conexo original em dois. Se, porém a aresta interior não é uma aresta de corte, será substituída por uma das ligações pertencente ao mesmo corte que a aresta em questão.

3) Quando se trata da retirada de medidas de injeção, basta apenas reconstruir o grafo de medição no que tange às arestas associadas.

Além da redução do tempo final de processamento do método em pauta, a atualização do grafo de medição fornece meios de melhor analisá-lo, viabilizando uma análise expedita a respeito da observabilidade do plano de medição recém-reconfigurado. Obtém-se assim uma maior redução do tempo computacional.

Esta análise expedita baseia-se nas seguintes constatações:

a) Se uma medida de fluxo é retirada do grafo de medição, como consequência desta retirada podem ocorrer as seguintes situações:

a.1) Uma medida de fluxo que anteriormente à retirada era uma ligação em ZB é então adicionada ao grafo, mantendo-se desta maneira o mesmo número de arestas de fluxo. Consequentemente preserva-se a observabilidade do sistema.

a.2) Apesar de nenhuma ligação ter sido adicionada, pode haver uma medida de injeção em um dos nós terminais da aresta de fluxo eliminada. Se não pertencer à árvore geradora observável básica do grafo de medição, esta medida de injeção pode substituir a aresta de fluxo retirada, permanecendo o plano observável.

b) Se uma medida de injeção em uma barra k é retirada do grafo de medição mas no outro extremo da aresta, a qual ela está originalmente associada, há uma medida de injeção não pertencente à árvore geradora observável, esta última medida substitui a medida de injeção retirada, mantendo-se assim a observabilidade.

Utilizando-se estas observações, é possível se concluir a respeito da observabilidade através de procedimentos heurísticos simples. Salienta-se

aqui que o não preenchimento das situações acima citadas não oferece subsídios para a conclusão de que o sistema é não-observável, tornando essencial a chamada ao procedimento OBSERV.

Esta análise expedita sobre a observabilidade reduz o número de chamadas à rotina que a determina e conseqüentemente o tempo computacional global do método.

Outra melhoria que torna o método enumerativo aplicável a situações realísticas de operação versa sobre o tratamento de mais de uma medida de fluxo numa linha de transmissão. Tal tratamento consiste simplesmente em substituição da linha original por duas linhas paralelas, cada uma das quais monitoradas em uma barra terminal.

O fluxograma da figura 5.3.1 apresenta o encadeamento dos procedimentos que englobam o método enumerativo para determinação de medidas (MDCRIT) e conjuntos críticos (CJCRIT), sendo que as figuras 5.3.2, 5.3.3 e 5.3.4 descrevem estes procedimentos em sua versão final.

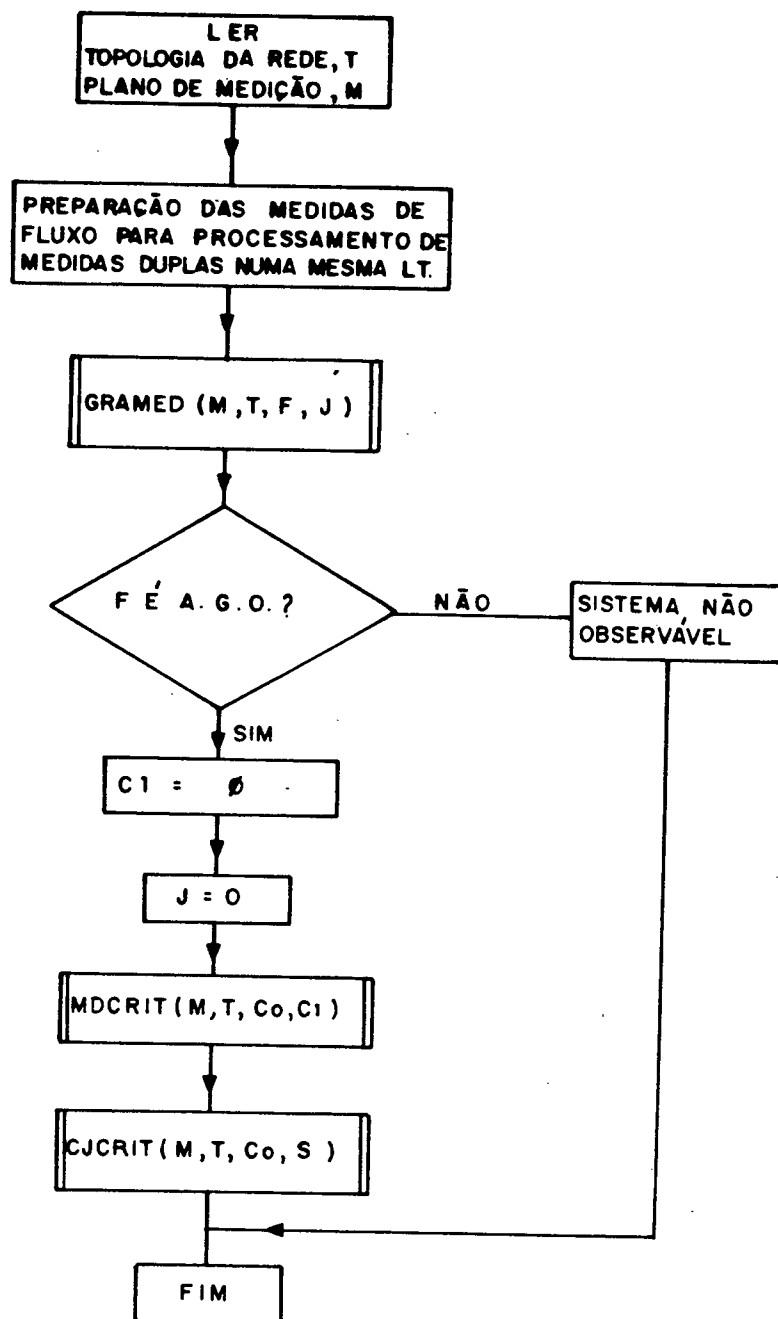


Figura 5.3.1 - Fluxograma Geral

(Os procedimentos GRAMED, MDCRIT e CJCRIT são descritos nas figuras 5.3.2, 5.3.3 e 5.3.4)

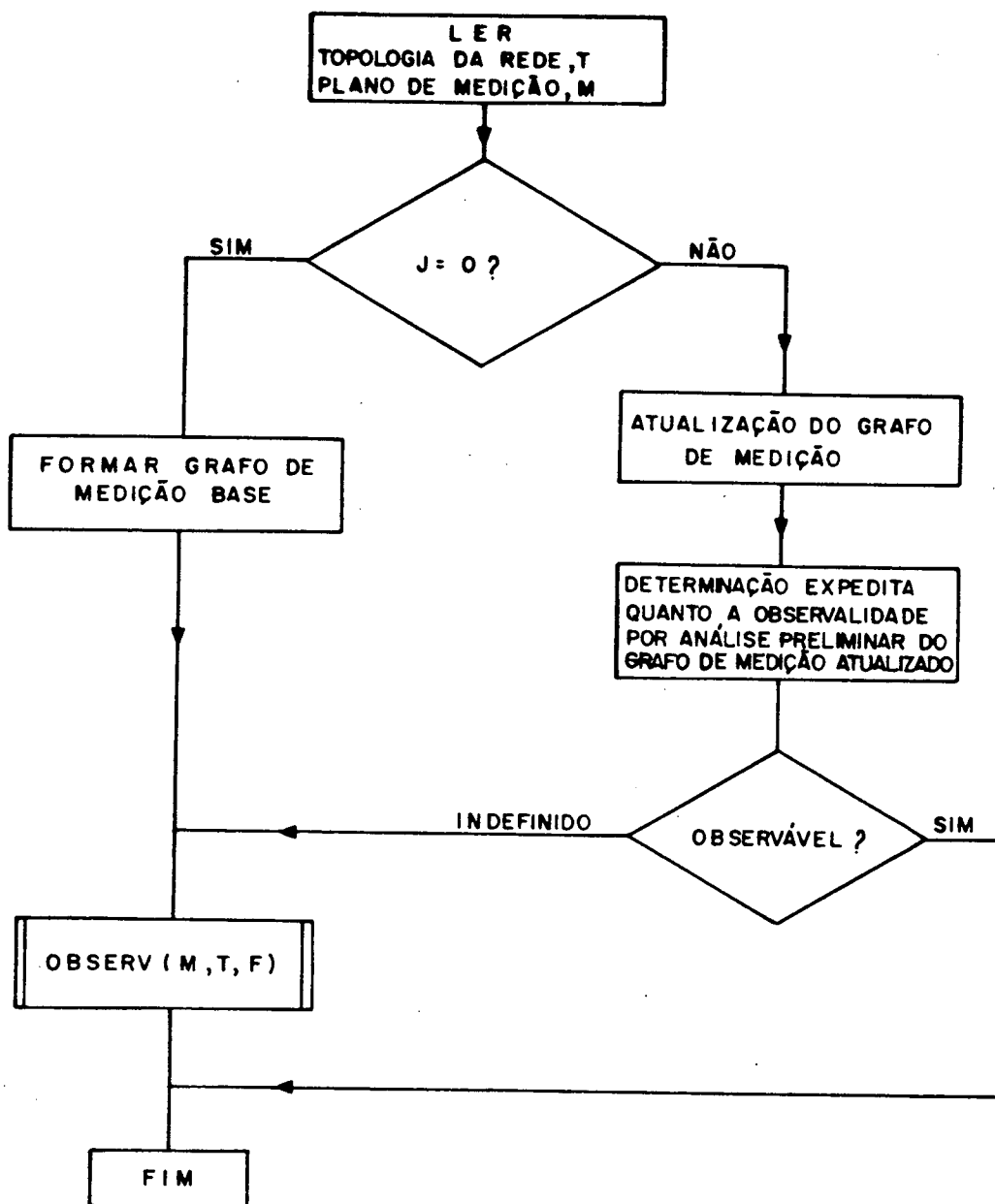


Figura 5.3.2 - Procedimento GRAMED (M, T, F, J): para atualização do grafo de medição e análise expedita da observabilidade

Entradas: - Plano de medição, M

- Topologia da rede, T

- Indicador para formação do grafo de medição base, J

Saída: - Floresta observável, F

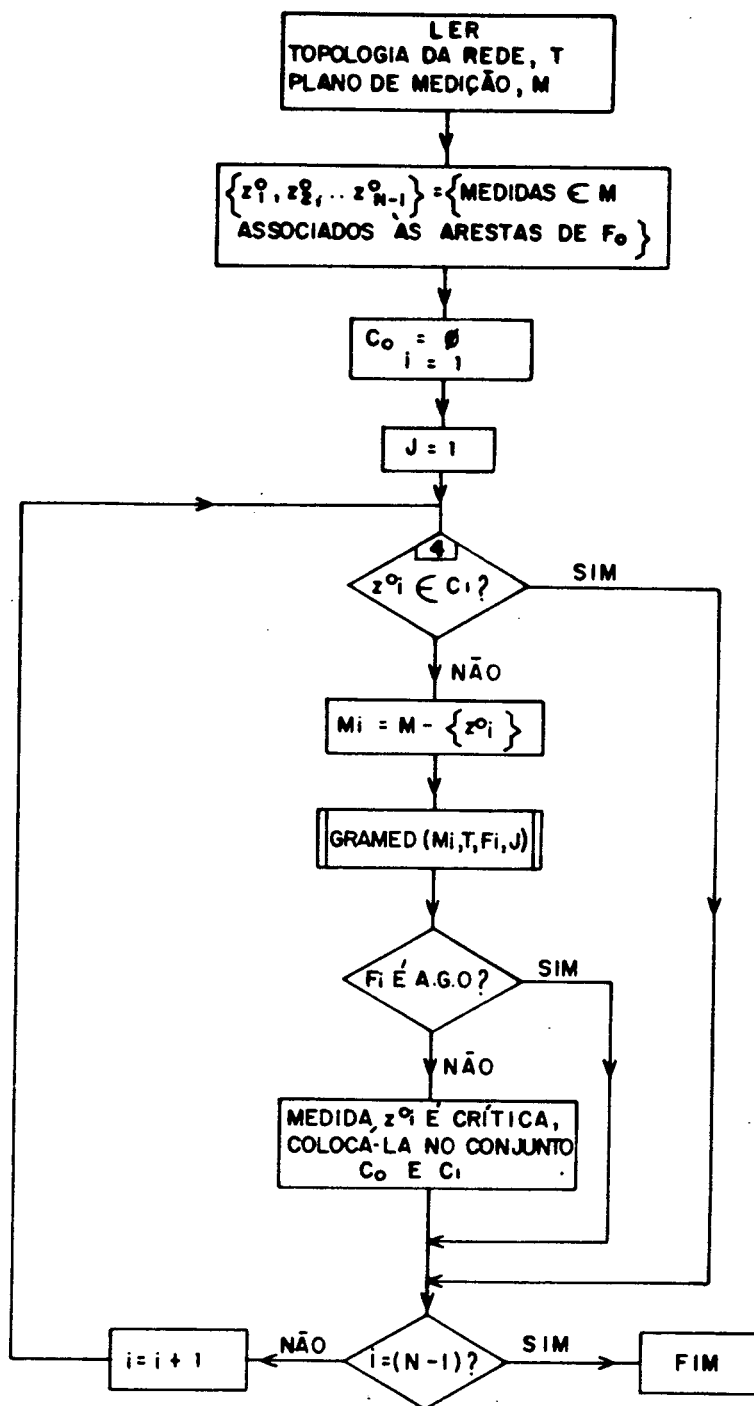


Figura 5.3.3 - Procedimento MDCRIT (M, T, C0, C1) - para determinação de medidas críticas (proc. enumerativo)

Entradas: - Plano de medição, M
- Topologia da rede, T

Conjuntos Auxiliares: - Conjunto de medidas críticas e de todas as medidas que façam parte de conjuntos críticos, C1

Saída: - Conjunto de medidas críticas, C0

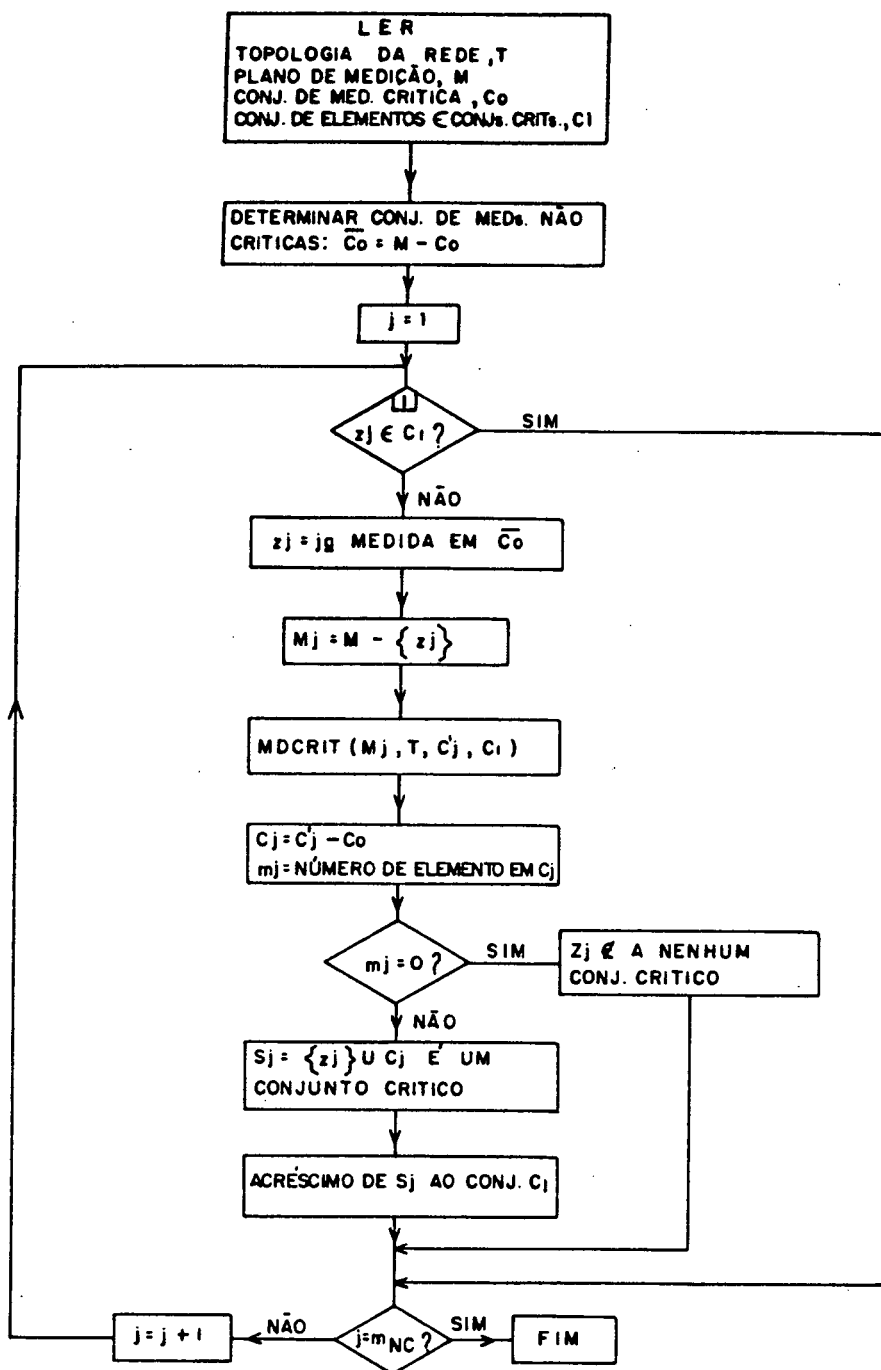


Figura 5.3.4 - Procedimento CJCRIT (M, C₀, T, S) - para determinação de conjuntos críticos

Entradas: - Plano de medição, M
- Conjunto de medidas críticas, C₀
- Topologia da rede, T

Conjuntos Auxiliares: - Conjunto de medidas críticas e dos elementos que pertencem aos conjuntos críticos, C₁

Saída: - Coleção de conjuntos críticos, S

5.4. Método Não-Enumerativo para Determinação de Medidas e Conjuntos Críticos

5.4.1 Considerações Gerais

O método enumerativo para determinação de medidas críticas, descrito na seção anterior, recorre sucessivamente ao procedimento para análise de observabilidade, o que o inviabiliza para aplicações "on line". Com o intuito de se obter um método mais eficiente, busca-se através da Teoria de Matróides, a obtenção de um método não-enumerativo, cujo desempenho computacional seja melhor que o do método enumerativo. Este novo procedimento se utiliza do método para determinação de elementos críticos de interseção de matróides (seção 3.8 do capítulo III).

5.4.2 Fundamentação do Problema

Segundo a seção 2.3.3 do capítulo II, um Sistema de Potência é observável topologicamente com respeito a um conjunto de medidas M se existir uma árvore geradora observável A.G.O. do grafo da rede com respeito a M . Como também já foi visto, esta A.G.O. nada mais é que a interseção I de máxima cardinalidade entre $M_1 = (E, \mathcal{J}_1)$ (matróide transversal) e de $M_2 = (E, \mathcal{J}_2)$ (matróide do grafo de medição), definidos conforme o plano de medição M em análise.

Baseado no exposto acima, é possível se definir uma medida crítica da seguinte maneira: uma medida crítica é aquela cuja supressão de M diminui a cardinalidade da interseção I . Assim, I deixa de ser uma A.G.O. e passa a ser uma floresta observável, ou seja, a retirada da medida crítica torna o sistema não-observável.

Esta nova definição mostra ser possível a determinação de medidas críticas pela utilização do método de determinação de elementos críticos de interseção de matróides (capítulo III), pois medida crítica e elemento crítico são entidades análogas.

A utilização deste algoritmo em S.E.P. consiste então na montagem do grafo bipartido auxiliar (capítulo IV) a partir da I obtida pelo procedimento OBSERV, e na busca de seqüências de troca, isto é, de seqüência de medidas que adicionadas e subtraídas a I não afetam sua cardinalidade. Deste modo, todos os elementos pertencentes a seqüências de trocas são medidas

não-críticas. Conclui-se, por exclusão, que as medidas de I não envolvidas em sequências de troca são medidas críticas.

A perspectiva deste método combinatório é bastante promissora, pois o grafo bipartido auxiliar é montado uma única vez, ao invés de sê-lo por $(N - 1)$ vezes, como exigido pelo método enumerativo.

5.4.3 Aplicação do Algoritmo para Determinação de Elementos Críticos de Interseção de Matróides

Antes de se dar prosseguimento ao algoritmo propriamente dito, é necessário que se teste a observabilidade do plano de medição em análise para a obtenção da A.G.O., isto é, da interseção de $M_1 = (E, \mathcal{J}_1)$ e $M_2 = (E, \mathcal{J}_2)$, onde:

E = conjunto de arestas do grafo de medição;

\mathcal{J}_1 = conjunto dos emparelhamentos no grafo bipartido de medição $ZM_b(A, B)$;

\mathcal{J}_2 = conjunto de árvores do grafo de medição ZM .

De posse da A.G.O., constrói-se o grafo bipartido auxiliar $G_{ba}(V_1, V_2)$, segundo a seção 4.4.2 do capítulo IV, onde:

$V_1 = \{v_1 : v_1 \in A.G.O.\}$,

$V_2 = \{v_2 : v_2 \notin A.G.O.\}$,

$X_1 = \{x_1 : x_1 \notin A.G.O., A.G.O. + x_1 \in \mathcal{J}_1\}$,

$X_2 = \{x_2 : x_2 \notin A.G.O., A.G.O. + x_2 \in \mathcal{J}_2\}$.

Cabe lembrar que X_1 é o conjunto de todas as arestas cujas medidas a elas associadas não integram a A.G.O. e que X_2 é o conjunto de arestas que ao serem adicionadas à A.G.O. não formam ciclos. Ora, a A.G.O. é uma base para o matróide $M_2 = (E, \mathcal{J}_2)$, o que significa que nenhum elemento pode ser adicionado a ela sem que um circuito fundamental seja formado. Então, como é suposto que a interseção em pauta é uma A.G.O., de antemão se sabe se que o conjunto X_2 é um conjunto vazio.

O conjunto $X_1 \subseteq V_2$

O passo seguinte consiste na formação das arestas direcionadas de $Z_{ba}(V_1, V_2)$. As regras para a formação deste grafo foram discutidas na seção 4.3 do capítulo IV.

Com o grafo $Z_{ba}(V_1, V_2)$ construído, buscam-se as sequências de troca, isto é, caminhos de X_1 para V_1 . Seja H o subconjunto de V_1 formado pelos vértices de Z_{ba} contidos nestes caminhos. Do que foi dito na seção

5.4.1, conclui-se que:

$$\{\text{elementos críticos}\} = V1 \setminus H \quad (5.1)$$

Exemplo 5.1 - Considere a topologia e plano de medição da figura 5.4.1.

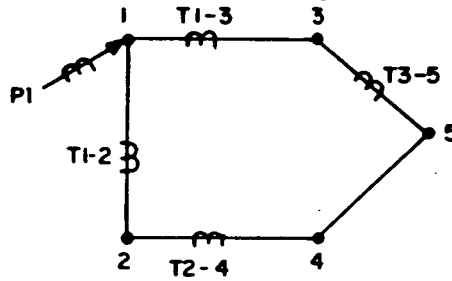


Figura 5.4.1 - Topologia da rede e plano de medição

O grafo de medição ZM e o grafo bipartido de medição ZMb(A,B) referentes ao plano de medição da figura 5.4.1 são representados na figura 5.4.2.

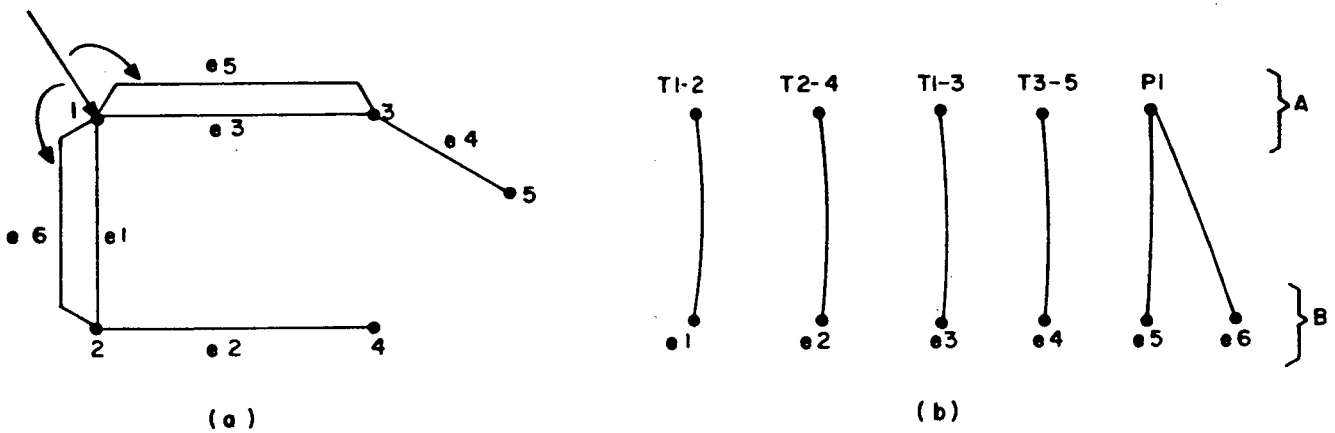


Figura 5.4.2 (a) ZM ; (b) ZMb(A,B)

A aplicação do procedimento OBSERV fornece a A.G.O. formado por $\{e_1, e_2, e_3, e_4\}$.

O grafo bipartido auxiliar correspondente, $Z_{ba}(V_1, V_2)$ é o seguinte:

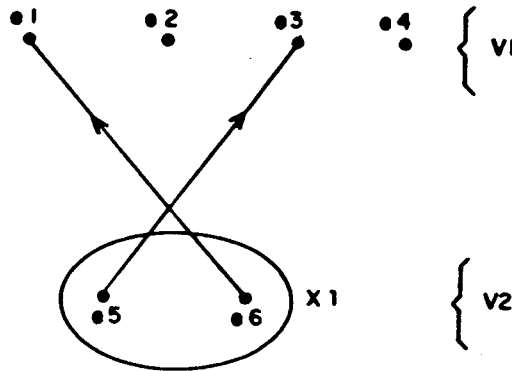


Figura 5.4.3 $Z_{ba}(V_1, V_2)$

Todos os possíveis caminhos T_j que ligam o conjunto X_1 ao conjunto V_1 são os seguintes:

$$T_1 = \{e_6, e_1\} \quad e \quad T_2 = \{e_5, e_3\}$$

então:

$$H = \{e_1, e_3\}$$

Assim:

$$\{\text{elementos críticos}\} = V_1 \setminus H = \{e_2, e_4\}$$

Os elementos críticos e_3 e e_4 correspondem às medidas críticas T2-4 e T3-5, respectivamente.

Conforme comentado na seção 3.8.2 do capítulo III, o método em análise pode falhar em determinadas circunstâncias. Isto ocorre quando há arestas paralelas em $Z_{ba}(V_1, V_2)$ e estas não são incluídas em sequências de troca. Observa-se então que o método indica os elementos contidos nos citados ciclos como críticos, quando na realidade não o são; tal assertiva é verificada pelo exemplo 3.8.2 do capítulo III.

Entretanto, o exemplo a seguir mostra que esta ressalva não procede na determinação de medidas críticas em Sistemas Elétricos de Potência, pois as arestas paralelas em $Z_{ba}(V_1, V_2)$ são, na verdade, arestas que relacionam elementos de uma mesma medida de injeção. Portanto, o remanejamento destes

elementos em nada afeta o conjunto de medidas associadas aos ramos da árvore.

Seja a seguinte topologia de rede e plano de medição:

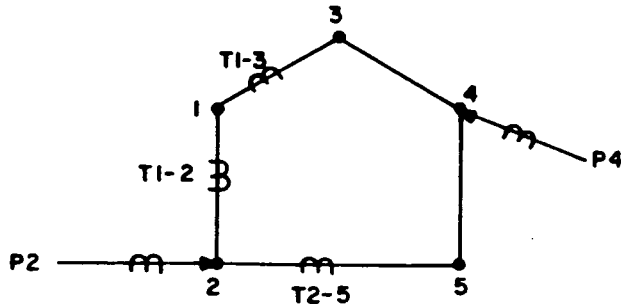


Figura 5.4.4-Topologia da rede e plano de medição

A figura 5.4.5 apresenta o grafo de medição e o grafo bipartido de medição relacionado à figura 5.4.4:

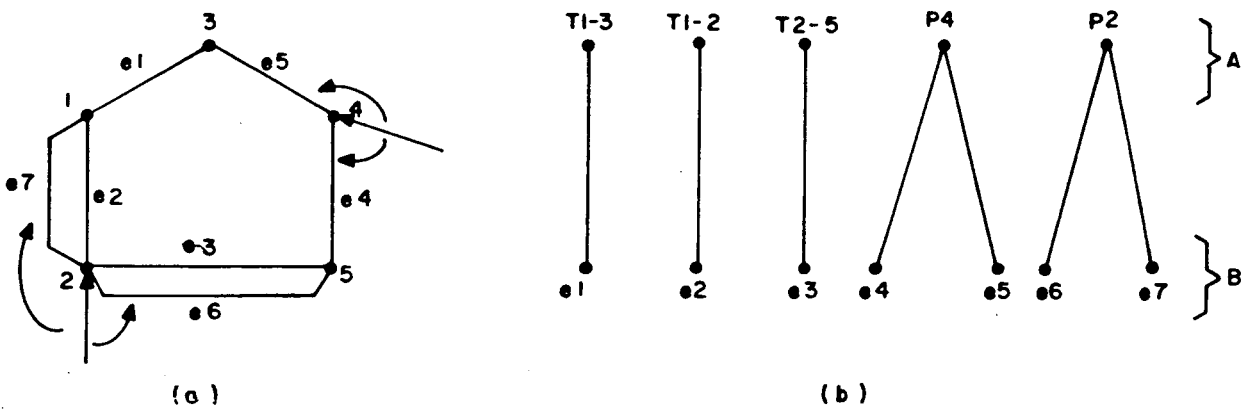


Figura 5.4.5 - (a) ZM; (b) ZMb(A,B)

Para a montagem do grafo bipartido auxiliar $G_{ba}(V_1, V_2)$, considera-se a seguinte A.G.O. = $\{e_1, e_2, e_3, e_4\}$.

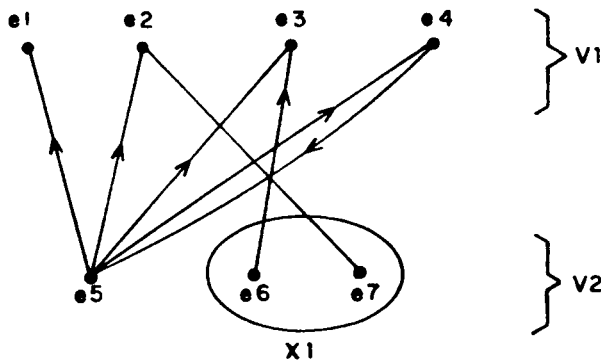


Figura 5.4.6 - $G_{ba}(V_1, V_2)$

Os caminhos possíveis de X_1 para V_1 são: $T_1 = \{e_7, e_2\}$ e $T_2 = \{e_8, e_3\}$, então:

$$H = \{e_2, e_3\}$$

e,

$$\{\text{elementos críticos}\} = \{e_1, e_4\}$$

A existência do ciclo entre e_4 e e_5 não afeta o resultado acima, pois estas arestas relacionam-se a uma mesma medida. Portanto, a troca de e_4 por e_5 é redundante.

Assim, fica claro que a utilização do método para determinar elementos críticos de interseção de matróides à identificação de medidas críticas em planos de medição apresenta resultados sempre corretos.

5.4.4 Aplicação do Algoritmo para Determinação de Conjuntos Críticos

Para a determinação de conjuntos críticos, continua a ser utilizado o procedimento CJCRIT, descrito na seção 5.3.1. Contudo, ao invés de se recorrer ao método enumerativo para determinação de medidas críticas, lança-se mão agora do método combinatório que é assunto da sub-seção anterior.

Na realidade, a determinação de conjuntos críticos ainda é enumerativa pois sua estrutura básica é idêntica ao processo descrito na seção 5.3.1, apenas diferindo quanto ao processo para determinar medidas críticas.

Ou seja, o fluxograma da figura 5.3.4 que apresenta o procedimento para determinação de conjuntos críticos permanece inalterado, tendo como única modificação o procedimento MDCRIT, cuja nova versão combinatória é descrito na figura 5.4.7.

Observa-se ainda que a sequência de chamadas aos procedimentos específicos (figura 5.3.1 e 5.3.2), assim como as alterações descritas na seção 5.3.2 são mantidas, pois deste modo se obtém um método cujo desempenho computacional é mais eficiente.

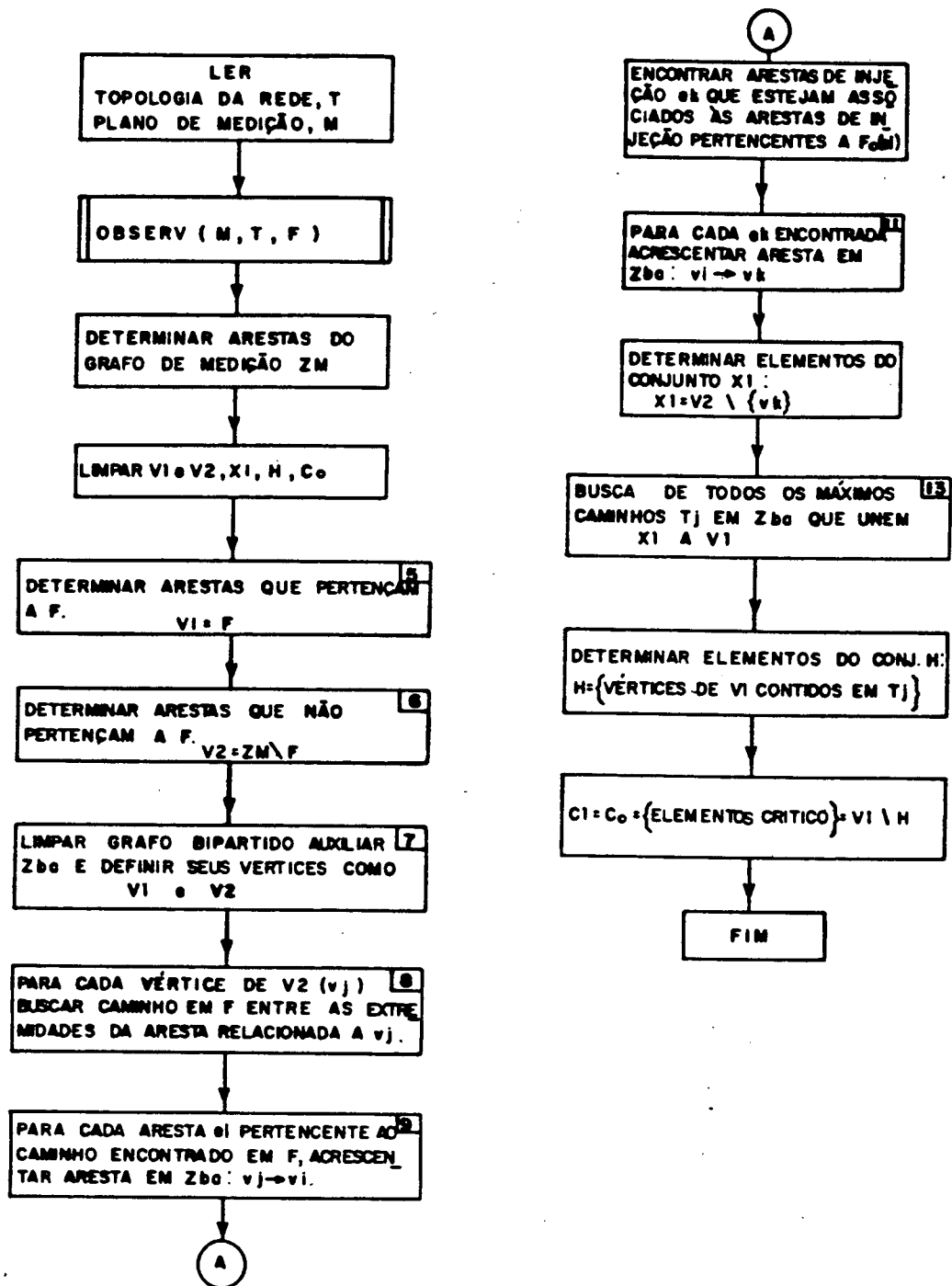


Figura 5.4.7 Procedimento MDCRIT (M, T, C0, C1): para determinação de medidas críticas (proc. não-enumerativo)

Entradas: - Plano de medição, M
- Topologia da rede, T

Conjuntos Auxiliares: - Conjunto de medidas críticas e de todas as medidas que façam parte de conjuntos críticos, C1

Saída: - Conjunto de medidas críticas, C0

5.4.5 Criticidade P- δ /Q-V

Assim como o estudo da observabilidade pode ser decomposto em estudo da observabilidade P- δ e observabilidade Q-V, assim também pode ser decomposto o estudo da criticidade das medidas ativas e reativas.

Para tanto, o tratamento utilizado na seção 4.4.1 do capítulo IV, que permite o processamento das medidas Q-V é também utilizado para a determinação de medidas e conjuntos críticos da parte ativa e da parte reativa. Porém, este tratamento, eficiente para a análise da observabilidade, precisa ser adaptado para a determinação de medidas e conjuntos críticos.

O sub-problema P- δ exige a seleção de um ângulo de referência, cuja arbitrariedade é decorrente do fato de ser o fluxo de potência ativo dependente da diferença angular entre as barras, e não de seus valores angulares.

O sub-problema Q-V não é tão simples de ser analisado. Uma componente só é observável se contiver pelo menos uma medida de módulo de tensão; ou seja, uma escolha arbitrária necessita ser feita (normalmente 1,0 pu) para salvaguardar a convergência do processo de estimação a este patamar de tensão. A ausência desta medida implica na não "estabilização" dos demais valores de módulo de tensão, por falta de referencial que os oriente na convergência.

Torna-se então evidente que esta medida de módulo de tensão (referência) é uma medida crítica, cujo valor afeta preponderantemente o fluxo de potência reativa. A localização desta medida de tensão dentro de um mesmo componente é contudo irrelevante [12].

Como visto na seção 2.2.4, cada medida de tensão é equivalentada a uma medida de fluxo de potência reativo que liga a barra em que é feita a medida com um nó adicional fictício (nó terra). Tendo em vista o parágrafo anterior, conclui-se que um componente da floresta Q-V só pode ser observável se o mesmo contiver o nó fictício [12].

Considere agora o caso em que são monitoradas várias medidas de módulo de tensão no sistema. Para ilustrar a discussão, considere a situação mostrada na figura 5.4.8, a qual representa um componente Q-V observável. Por conveniência não é representado na figura o nó terra.

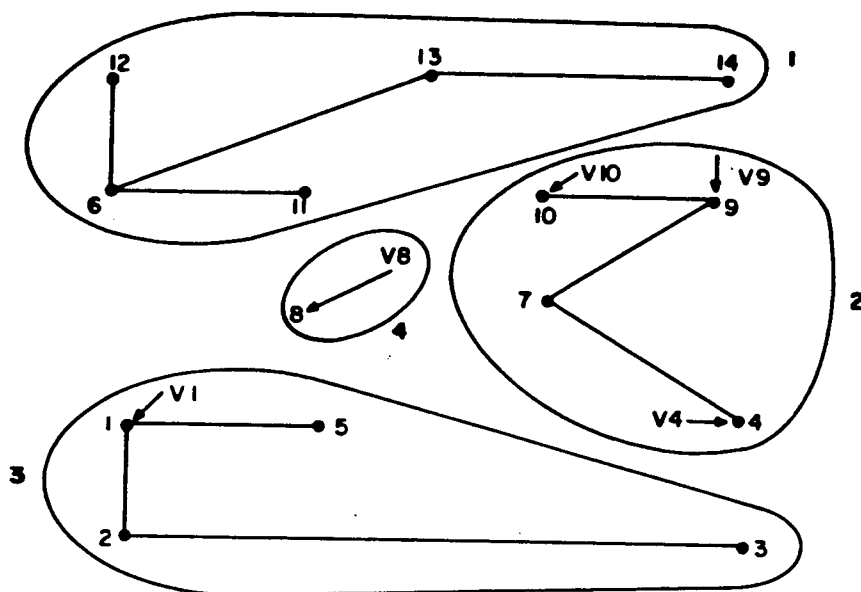


Figura 5.4.8 - Floresta observável de plano reativo

O componente número 2 é monitorado por três medidas de tensão. A retirada de cada uma delas, separadamente, não afeta a observabilidade do sistema. Contudo, se forem retiradas as três medidas ao mesmo tempo, recai-se na situação onde o componente está desprovido de nó-terra, tornando assim o sistema não-observável. Conclui-se que estas três medidas formam um conjunto 2-crítico, pois a retirada de duas medidas deixa o sistema ainda observável, o mesmo não acontecendo com a retirada de todas as três medidas.

Vê-se, portanto, a importância de se analisar cada componente fornecido pelo plano de medição Q-V, a fim de se obter todas as informações a respeito da criticidade de suas medidas de tensão.

Como já mencionado, o artifício de acrescentar o nó fictício para tratamento das medidas de módulo de tensão é eficiente para a análise da observabilidade, mas falho no que se relaciona à determinação de medidas e conjuntos críticos.

Ou seja, quando se simula um plano de medição Q-V onde há apenas uma medida de tensão é preciso que, independentemente ao procedimento MDCRIT, se designe esta medida como crítica (situação não detectada pelo procedimento) para que esta não venha a formar inadvertidamente um conjunto crítico no desenrolar do procedimento CJCRIT.

Para o caso de várias (NV) medidas de tensão, a mesma situação ocorrida acima pode se repetir. Porém, neste caso, a conclusão do procedimento

não é necessariamente errônea, pois a presença de outras medidas de tensão assegura a observabilidade quando da retirada de uma medida de tensão pertencente a um conjunto crítico.

A falha do procedimento, neste caso, é a impossibilidade de se determinar conjuntos k -críticos (com k maior que 1). Este problema é contornado pela introdução do procedimento VCRT (figura 5.4.10) que determina conjuntos k -críticos formados apenas por medidas de módulos de tensão, onde k varia de 0 a $(NV - 1)$.

Assim, a sequência de processamento, utilizada tanto pelo método enumerativo quanto pelo não-enumerativo, é apresentada pela figura 5.4.9.

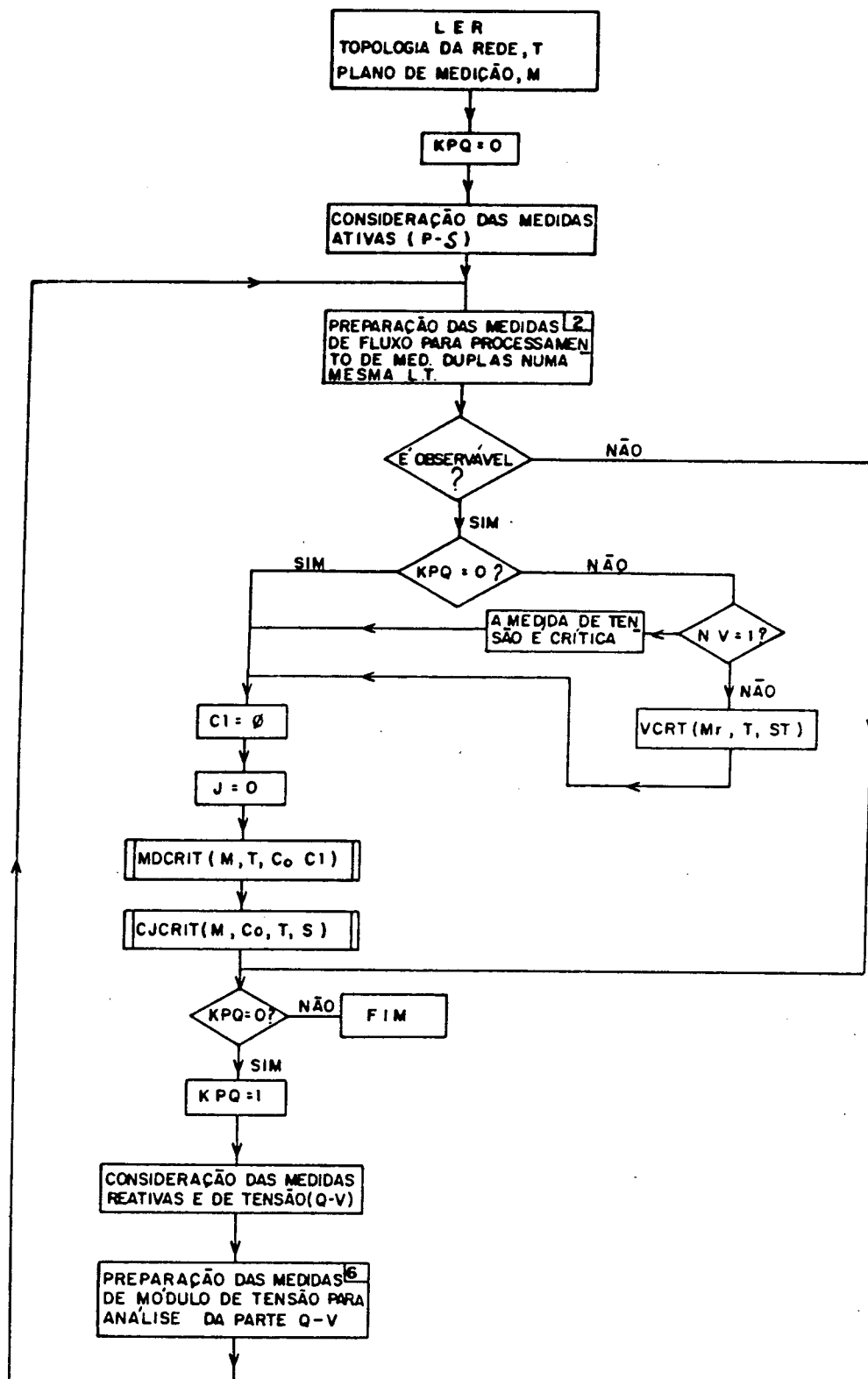


Figura 5.4.9 - Fluxograma Geral

(O procedimento VCRT é descrito na Figura 5.4.10)

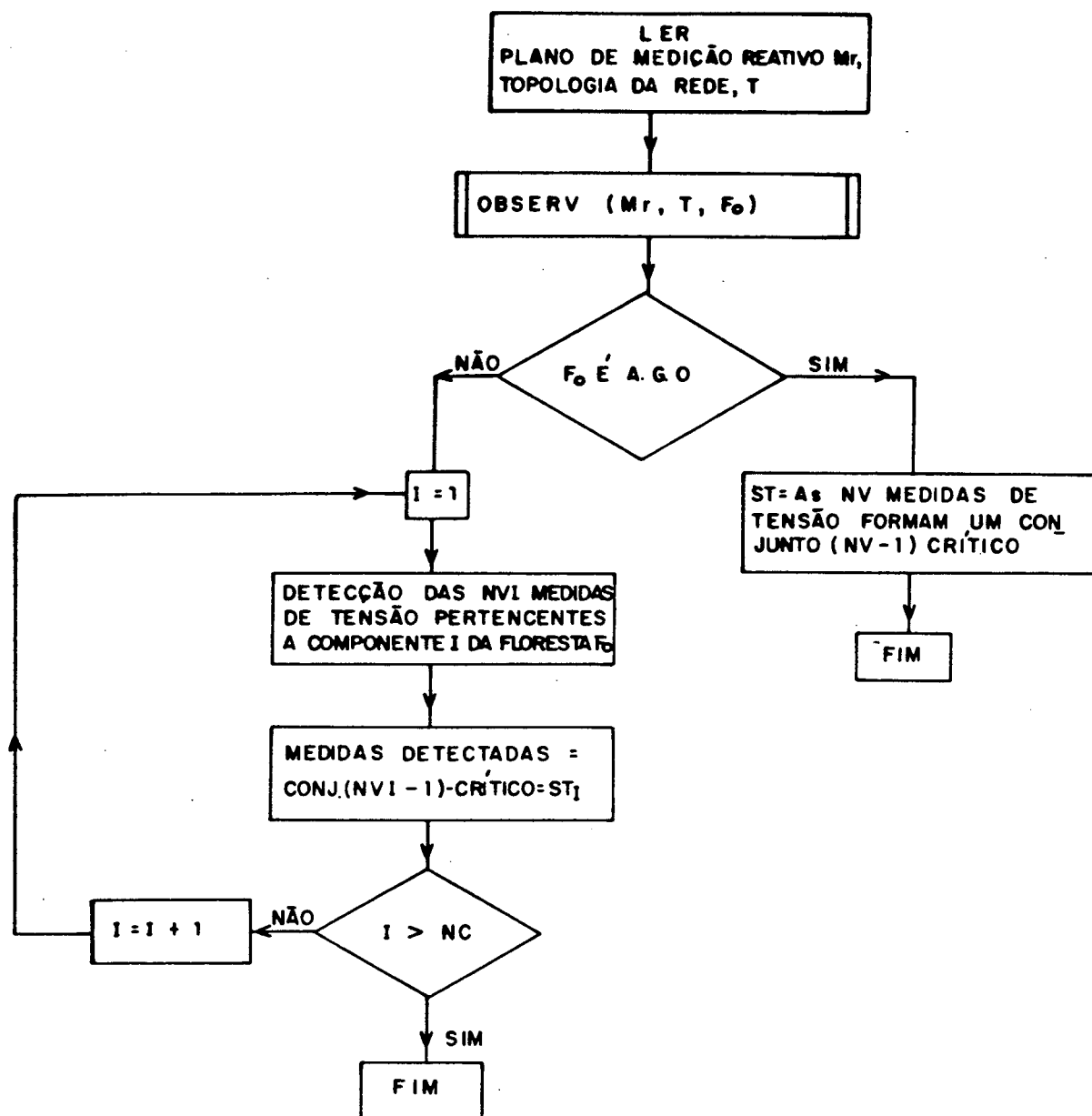


Figura 5.4.10 - Procedimento VCRT (M_r , T , ST) - para determinação de conjuntos k-críticos de medidas de módulos de tensão

Entrada: - Topologia da rede, T

- Plano de medição reativo, M_r

Conjuntos auxiliares: - Número de componentes da floresta F , NC

- Número de medidas de tensão encontradas em componente I considerada, NVI

Saída: - Coleção de conjuntos k-críticos compostos por medidas de módulo de tensão, ST

CAPÍTULO VI

ALOCAÇÃO DE PSEUDOMEDIDAS CRÍTICAS A PLANOS DE MEDIÇÃO DEFICIENTES

6.1 Introdução

Quando o sistema é não-observável, isto é, quando o plano de medição M apresenta uma redundância global insuficiente para a determinação de todos os seus estados, é importante que se forneça informação adicional a M a fim de que se torne possível a estimação de estados.

Este capítulo versa sobre a conveniente alocação desta informação adicional, ou melhor, destas pseudomedidas, que restauram a observabilidade do sistema em análise.

A estratégia aqui estudada se refere à adição de pseudomedidas críticas que transformam o sistema não-observável em observável, utilizando-se para tanto dos métodos para determinação de interseção de matróides e de determinação de elementos críticos em interseção de matróides descritos no capítulo III. A organização do capítulo é a seguinte. A seção 6.2 apresenta a fundamentação do problema de recuperação de planos de medição deficientes através da Teoria de Matróides, enquanto que a seção 6.3 descreve o algoritmo advindo desta fundamentação que aloca pseudomedidas críticas com o intuito de restaurar a observabilidade de planos de medição deficientes.

6.2 Fundamentação Teórica

Nos casos em que não é encontrada uma árvore geradora observável, o algoritmo que determina a observabilidade topológica descrito no capítulo IV conclui que o sistema de potência é não-observável. Nestes casos, uma das alternativas para contornar o problema é a alocação de pseudomedidas adequadas a fim de viabilizar a estimação de estados do sistema.

O método de alocação de pseudomedidas proposto neste trabalho inicia com a adição de um conjunto de pseudomedidas M_{ps} ao plano de medição M . Este conjunto pode se originar de procedimentos auxiliares, tal como previsão de carga em barras, ou procedimentos estatísticos baseados no histórico das últimas estimativas. Assim, pode-se exemplificar como pseudomedidas as

seguintes quantidades: injeções em barras de carga que se mantêm constantes ao longo do dia ou que são sujeitos a procedimentos de previsão, fluxo de intercâmbio entre áreas, etc... Salieta-se que o presente trabalho não se atém à elaboração do conjunto de pseudomedidas disponíveis Mps. Enfoca-se aqui a questão de se determinar as pseudomedidas críticas já a partir de um conjunto pré-determinado, composto por pseudomedidas de injeção e fluxo. Apesar de na prática ser dada uma certa preferência às pseudomedidas de injeção (conforme exemplificado), o método aqui proposto não se restringe obrigatoriamente a elas, sendo também possível a incorporação de pseudomedidas de fluxo.

Após Mps ter sido adicionado a M, aciona-se novamente o algoritmo para análise de observabilidade. Se o conjunto Mps for suficiente, uma árvore geradora observável é encontrada. Se todas as pseudomedidas incorporadas à A.G.O. são críticas, isto é, se são alocadas p pseudomedidas, onde p indica o número mínimo de pseudomedidas que devem ser adicionadas a M (capítulo II), o processo está terminado.

Cabe aqui relembrar a importância de as pseudomedidas serem críticas. Sabe-se da seção 2.4 do capítulo II que uma medida crítica não interage com outras medidas. Como as pseudomedidas são, em geral, menos confiáveis que as telemidas, opta-se pela incorporação de pseudomedidas críticas, a fim de que seus erros não contaminem as partes observáveis do sistema.

Assim, se são incluídas um número de medidas maior que p e portanto nem todas as pseudomedidas adicionadas à A.G.O. são críticas, faz-se uso do grafo bipartido auxiliar Z_{ba} (V_1, V_2). Este permite a substituição das pseudomedidas redundantes por telemidas existentes. O grafo bipartido auxiliar Z_{ba} (V_1, V_2) é construído tanto pelo algoritmo de análise de observabilidade quanto pelo algoritmo de determinação de medidas críticas (ver seções 4.3 e 5.4).

Sobre o grafo bipartido auxiliar Z_{ba} (V_1, V_2) são então encontradas sequências de troca, ou seja, sequências de vértices correspondentes a arestas que adicionadas e subtraídas à A.G.O. a mantêm com a mesma cardinalidade e independência.

Uma medida é não-crítica se puder ser substituída na A.G.O. por outras medidas. Assim sendo, os vértices de Z_{ba} (V_1, V_2) correspondentes a medidas não-críticas estão obrigatoriamente contidas em sequências de troca.

Conclui-se daí que uma pseudomedida não-crítica está contida em uma das seqüências de troca existentes em Z_{ba} (V_1 , V_2), sendo possível substituí-la por uma telemida contida na mesma seqüência de troca que não pertence à A.G.O. Este processo de substituição de pseudomedidas não-críticas é repetido até que elas se esgotem e que se aloquem apenas p pseudomedidas críticas.

É importante relembrar como o grafo bipartido auxiliar Z_{ba} (V_1 , V_2) é montado tendo por base os matróides $M_1 = \{E, \mathcal{J}_1\}$ e $M_2 = \{E, \mathcal{J}_2\}$, respectivamente matróide transversal e matróide do grafo de medição. A interseção de M_1 e M_2 é uma A.G.O., no caso de sistemas observáveis. Sejam novamente os conjuntos V_1 e V_2 de Z_{ba} , definidos como:

$$V_1 = \{v_1 : v_1 \in \text{A.G.O.}\},$$

$$V_2 = \{v_2 : v_2 \notin \text{A.G.O.}\},$$

$X_1 = \{x_1 : x_1 \notin \text{A.G.O.}, \text{A.G.O.} + x_1 \in \mathcal{J}_1\}$, ou seja, conjunto de todas as arestas cujas medidas a elas associadas não integram a A.G.O.

$X_2 = \{x_2 : x_2 \notin \text{A.G.O.}, \text{A.G.O.} + x_2 \in \mathcal{J}_2\}$, é o conjunto de arestas que ao serem adicionadas à A.G.O. não formam ciclos. Como a A.G.O. é uma base para $M_2 = \{E, \mathcal{J}_2\}$, não existem arestas que se adicionadas manteriam independência em M_2 . Assim:

$$X_2 = \emptyset$$

As arestas de Z_{ba} (V_1 , V_2) são assim montadas:

-Cada vértice de $v_1 \in V_1$ é conectado ao vértice de $v_2 \in V_2$ que esteja associado à mesma medida associada a v_1 , ou seja, cria-se $v_1 \Rightarrow v_2$ em Z_{ba} (V_1 , V_2).

-Cada vértice $v_2 \in V_2$ é conectado aos vértices $v_1 \in V_1$ que correspondem às arestas do caminho na A.G.O. conectando os nós terminais i e j da aresta relacionada a v_2 . Ou seja, cria-se $v_2 \Rightarrow v_1$ em Z_{ba} (V_1 , V_2).

Os caminhos T_j de X_1 para V_1 correspondem às seqüências de troca. Assim, para cada pseudomedida não-crítica y , busca-se um caminho T_y de X_1 para y , sendo que a operação $\text{A.G.O.} \Delta T_y$, substitui y por uma telemida representada em V_2 .

6.3 Descrição do Algoritmo para Alocação de Pseudomedidas Críticas

Considere o conjunto de telemidas M e o conjunto de pseudomedidas disponíveis M_{pso} . Caso M não seja suficiente para a formação de uma A.G.O. proveniente da interseção de $M_1 = \{E, J_1\}$ e $M_2 = \{E, J_2\}$, há a necessidade de se prever a alocação de pseudomedidas.

Assim, é realizada a união de M_{pso} a M , sendo esta união ($M_{pso} \cup M$) novamente submetida ao algoritmo de análise de observabilidade. Se mesmo assim uma A.G.O. não for encontrada, conclui-se que M_{pso} é insuficiente para o restabelecimento da observabilidade.

Caso uma A.G.O. seja encontrada, elimina-se todas as pseudomedidas não pertencentes a ela, isto é, as pseudomedidas em $M_{pso} \setminus A.G.O.$. O conjunto remanescente de pseudomedidas passa a ser $M_{ps1} = M_{pso} \cap A.G.O.$

A fim de verificar se M_{ps1} é composto apenas por pseudomedidas críticas, o conjunto $M \cup M_{ps1}$ é submetido ao algoritmo que determina medidas críticas. Em caso de todo o conjunto M_{ps1} ser crítico, este é incorporado definitivamente a M de modo a possibilitar a estimação de estado completa da rede.

Porém, se M_{ps1} for composto por pseudomedidas não-críticas, estas devem ser substituídas por telemidas que estão contidas em sequências de troca.

Considere uma pseudomedida não-crítica y pertencente a M_{ps1} . Busca-se um caminho em Z_{ba} (V_1, V_2) que ligue X_1 a y , sendo que X_1 é o conjunto de arestas de injeção tais que a A.G.O. não contém arestas associadas àquelas injeções. Este caminho é uma sequência de troca. Assim sendo, as arestas relacionadas aos vértices que ocupam as posições ímpares nesta sequência de troca são retiradas da A.G.O., enquanto que as que ocupam posições pares são a ela adicionadas.

Neste processo de adição e subtração, sempre se efetua uma troca de y (pseudomedida não-crítica) por uma telemida. Isto se deve ao fato de V_2 ser composto apenas por telemidas. Este processo de substituição se repete até que todas as pseudomedidas redundantes sejam retiradas do conjunto M_{ps1} e nele restem exclusivamente pseudomedidas críticas. Este algoritmo é apresentado esquematicamente no fluxograma da figura 6.1.

É apresentado a seguir um exemplo de aplicação do algoritmo para alocação de pseudomedidas críticas, considerando o plano de medição e grafo de

medição da figura 6.2:

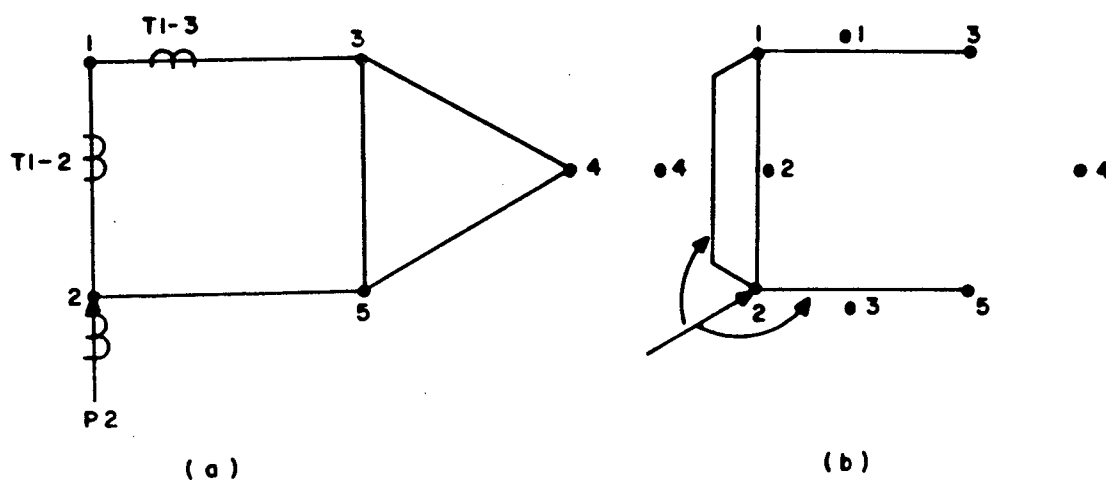


Figura 6.2 (a) Plano de medição M, (b) Grafo de medição ZM

Este plano de medição é não-observável e a floresta observável maximal obtida pelo algoritmo de interseção de matróides (procedimento OBSERV) é $FO = \{e_1, e_2, e_3\}$, a qual corresponde às medidas $\{T1-3, T1-2, P2\}$ e é representada pela figura 6.3.

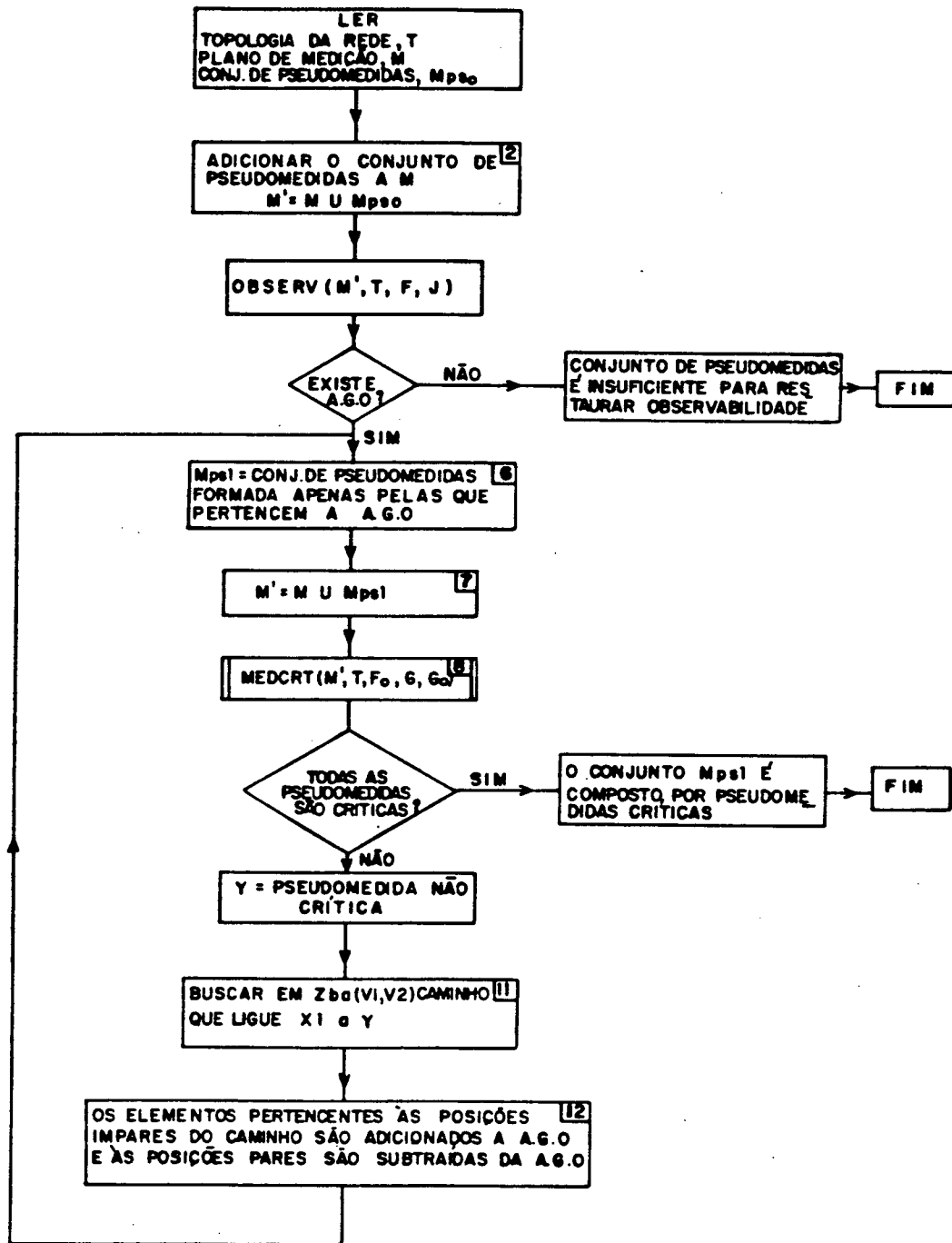


Figura 6.1. Procedimento ALOCA (M, Mps0, T, Mps1)

Entradas: -Plano de medição, M

-Conjunto de pseudomedidas, Mps0

-Topologia da rede

Saída: -Conjunto de pseudomedidas críticas, Mps1

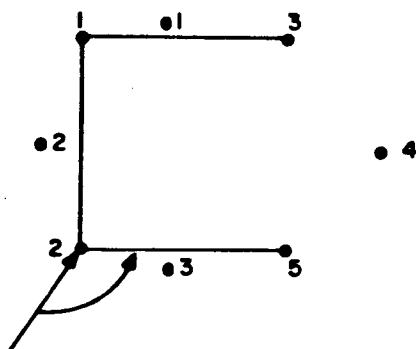


Figura 6.3 Floresta observável maximal

Para transformar FO em uma A.G.O., o conjunto de pseudomedidas $M_{pso} = \{P5, T2-5, T4-5\}$ é adicionado a M de forma que o grafo de medição passa a ser o da figura 6.4, onde as arestas tracejadas correspondem às pseudomedidas. Para distingui-la das telemidas na descrição a seguir, as pseudomedidas serão indicados com um asterisco. No caso de M_{pso} , por exemplo, usa-se $P5^*$, $T2-5^*$, $T4-5^*$.

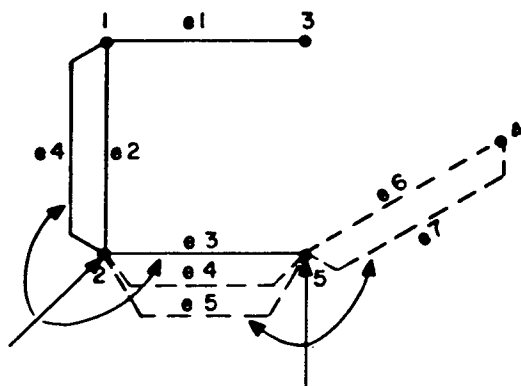


Figura 6.4 Grafo de medição correspondente a $M \cup M_{pso}$

A partir da incorporação de M_{pso} a M, o procedimento OBSERV pode encontrar a A.G.O. $= \{e_1, e_2, e_5, e_6\}$, a qual corresponde às telemidas e pseudomedidas $T1-3, T1-2, T2-5^*, T4-5^*$.

De M_{pso} são retiradas as pseudomedidas não pertencentes à A.G.O., restando assim o conjunto $M_{ps1} = \{T2-5^*, T4-5^*\}$.

Constrói-se o grafo bipartido auxiliar Z_{ba} (V_1, V_2) baseado na árvore geradora observável determinada pelo proc. OBSERV, e baseado em

M U Mps .

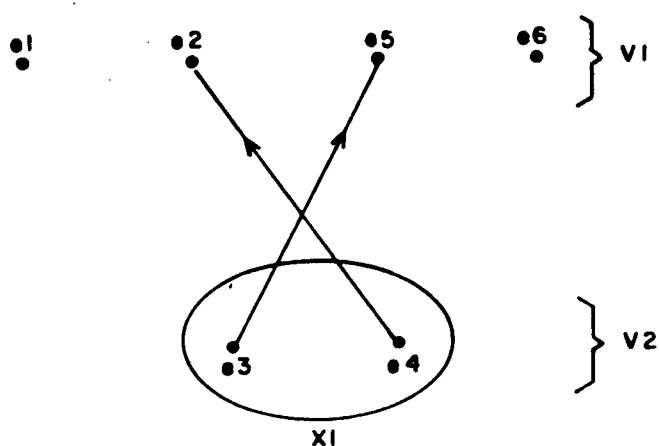


Figura 6.5 - Grafo bipartido auxiliar $Z_{ba}(V_1, V_2)$

Aplicando o algoritmo para determinação de medidas críticas, ou seja, detectando as sequências de troca $T_1 = \{e_3, e_5\}$ e $T_2 = \{e_4, e_2\}$, obtém-se $H = \{e_2, e_5\}$ (ver seção 5.4.2 do capítulo V) e:

$$\{\text{elementos críticos}\} = V_1 \setminus H = \{e_1, e_6\}$$

Estes elementos críticos correspondem à medida T1-3 e à pseudomedida T4-5*.

Assim, a pseudomedida não-crítica T2-5* deve ser substituída pela telemedida pertencente à sequência de troca $T_1 = \{e_3, e_5\}$. A A.G.O. passa a ser formada por $\{e_1, e_2, e_3, e_6\}$ onde só há uma pseudomedida crítica, que é T4-5*.

Se, após esta substituição da pseudomedida não-crítica por uma telemedida, ainda restassem pseudomedidas não-críticas, o grafo bipartido auxiliar deveria ser reconstruído para que se processasse nova substituição. Este processo seria repetido até que todas as pseudomedidas alocadas a M fossem críticas.

6.4 Fluxograma Geral

O fluxograma da figura 6.6 apresenta uma visão global de todo o processo de determinação de medidas e conjuntos críticos, agora acrescido do procedimento para alocação de pseudomedidas para o caso de planos não-observáveis. Observa-se que o desacoplamento entre a parte P- δ e Q-V continua a ser considerada, sendo alocadas pseudomedidas de injeção e de fluxo

ativo independentemente da alocação de pseudomedidas de injeção e fluxo reativo.

6.5 Considerações Finais

Devido a importância de se estimar todos os estados do sistema, é necessário que se adquira meios de restaurar planos de medição deficientes, isto é, planos cuja redundância é insuficiente para que se obtenha uma estimação global do sistema. A fim de contornar este problema, aloca-se pseudomedidas ao plano de medição.

Pseudomedidas são quantidades menos confiáveis que as telemidas. Assim, deve-se adicionar pseudomedidas críticas, pois deste modo se está limitando o efeito das mesmas apenas sobre as partes não-observáveis do sistema.

O método proposto neste capítulo para alocação de pseudomedidas críticas pode na verdade ser entendido como uma adaptação ao método que determina medidas críticas apresentado no capítulo V. Ambos se baseiam em sequências de troca, sendo que o método aqui estudado permuta as pseudomedidas não-críticas por telemidas redundantes contidas em uma mesma sequência de troca.

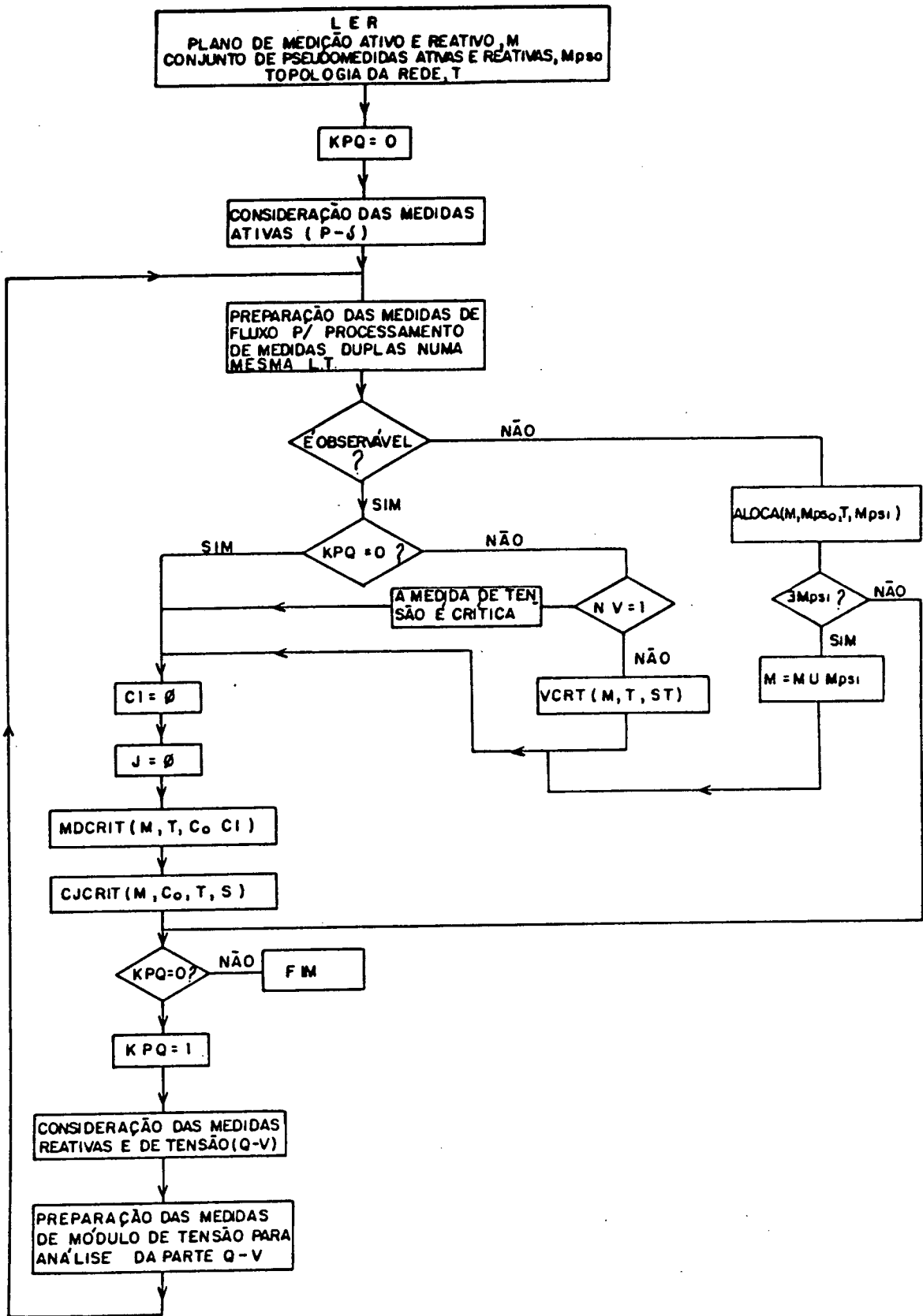


Figura 6.6 - Fluxograma Geral

CAPÍTULO VII

RESULTADOS

7.1 Introdução

Quatro Sistemas-teste com diferentes planos de medição são submetidos aos procedimentos descritos nos capítulos V e VI. Os resultados correspondentes são apresentados neste capítulo.

Os diagramas unifilares e as diferentes configurações de planos de medição dos 4 Sistemas de Potência utilizados para os testes de desempenho são apresentados no Apêndice II. Estes Sistemas de Potência correspondem aos sistemas teste de 14 barras e 30 barras do IEEE e a dois outros obtidos da rede interligada da região Sul do Brasil. Ressalta-se que a rede de 74 barras retrata um caso realístico de operação do Sistema Sul.

Os programas de computador desenvolvidos para a análise da observabilidade [5], para a determinação de medidas e conjuntos críticos (proc. enumerativo e não-enumerativo) e para a alocação de pseudomedidas críticas são descritos no Apêndice I. Estes programas foram implementados e executados no computador IBM 4381 da UFSC.

A organização do capítulo é a seguinte: na seção 7.2 são apresentadas as medidas e conjuntos críticos determinados tanto pelo procedimento topológico enumerativo quanto não-enumerativo. A seção 7.3 se dedica à análise dos resíduos normalizados com o intuito de verificar a partir destes os resultados obtidos topologicamente. Na seção 7.4 faz-se um estudo a respeito da conservatividade dos resultados fornecidos pelo procedimento que determina medidas e conjuntos críticos formados apenas por medidas de módulo de tensão. A seção seguinte apresenta os ganhos computacionais obtidos pelas alterações introduzidas no procedimento enumerativo originalmente proposto em [10]. A comparação entre os procedimentos enumerativo e não-enumerativo para a determinação de medidas críticas é apresentado na seção 7.6. Finalmente, na seção 7.7 são feitas alocações de pseudomedidas críticas em sistemas não-observáveis topologicamente, bem como uma análise do efeito da introdução das mesmas na estimação de estados.

7.2 Determinação de Medidas e Conjuntos Críticos

7.2.1 Considerações gerais

Os diferentes planos de medição simulados para cada um dos 4 Sistemas de Potência analisados são apresentados no Apêndice II.

O Sistema de Potência de 14 barras do IEEE é testado por 3 planos de medição diferentes, os quais são designados por caso A.1, A.2 e A.3. O número de medidas neles contidas figura na Tabela 7.2.1.

Tabela 7.2 1 Número de Medidas Simuladas nos Três Planos de Medição do Sistema de 14 Barras

SISTEMA DE 14 BARRAS DO IEEE			
Caso	Número de Pares de Medidas Ativas/Reativas	Número de Módulos de Tensão	Número Total de Medidas
A.1	22	1	45
A.2	15	1	31
A.3	16	1	33

Para o Sistema de Potência de 30 barras do IEEE, são simulados 2 planos de medição, que correspondem aos casos B.1 e B.2.0 total de medidas contidas em cada um deles é apresentado na Tabela 7.2.2.

Tabela 7.2.2 Número de Medidas Simuladas nos Dois Planos de medição do Sistema de 30 Barras

SISTEMA DE 30 BARRAS DO IEEE			
Caso	Número de Pares de Medidas Ativas/Reativas	Número de Módulos de Tensão	Número Total de Medidas
B.1	42	1	85
B.2	48	1	97

Já os sistemas de potência da região Sul do Brasil são designados por SUL 121 e SUL 74, já que os sistemas apresentam 121 barras e 74 barras, respectivamente. O número total de medidas contidas em cada um deles figura na Tabela 7.2.3.

Tabela 7.2.3-Número de Medidas Simuladas nos Planos de Medição do Sistema de 121 e 74 Barras

SISTEMA DA REGIÃO SUL DO BRASIL			
Caso	Número de Pares de Medidas Ativas/Reativas	Número de Módulos de Tensão	Número Total de Medidas
Sul 121	130	1	261
Sul 74	207	26	440

7.2.2 Medidas Críticas

As medidas críticas determinadas pelo método enumerativo e não-enumerativo são a seguir apresentados. Antes disso, é conveniente descrever a nomenclatura utilizada: P_n , indica medida de injeção de potência ativa na barra n ; Q_n , indica medida de injeção de potência reativa na barra n ; T_{i-j} , indica medida de fluxo ativo na linha $i-j$; U_{i-j} , indica medida de fluxo reativo na linha $i-j$; V_n , medida de módulo de tensão na barra n .

Caso A.1

Medidas críticas = {P8, T10-11, Q8, U10-11, V1}

Caso A.2

Medidas críticas = {P9, P10, P12, P13, P14, T6-10, T7-8, Q9, Q10, Q12, Q13, Q14, U6-10, U7-8, V1}

Caso A.3

Medidas críticas = {P5, P6, P9; P10, P12, P13, Q5, Q6, Q9, Q10, Q12, Q13, V1}

Caso B.1

Medidas críticas = {V1}

Caso B.2

Medidas críticas = {P11, P13, Q11, Q13, V1}

Caso SUL 121

Medidas críticas = {P1, P3, P5, P6, P10, P22, P25, P28, P29, P31, P33, P49, P50, P53, P55 a P57, P59 a P62, P67 a P71, P73, P78, P79, P82, P84, P91, P92, P96, P97, P104, P106, P109, P114, P116, P119, P120, T83-85, T75-76, T52-54, T51-54, T76-77, T7-9, T74-77, T72-74, T32-34, T30-31, T63-64, T23-24, T43-44, T46-47, T21-22, T95-98, T27-93, T26-27, idem para a parte reativa, V1}.

Caso Sul 74

O plano de medição simulado para este sistema de 74 barras é não-observável topologicamente.

7.2.3 Conjuntos Críticos

A determinação dos conjuntos críticos existentes nos 7 casos testados é feita pelo procedimento CJCRIT descrito no Cap. V. Para a obtenção dos mesmos, foram utilizados tanto o procedimento que utiliza o método enumerativo quanto o procedimento baseado no método não-enumerativo para determinar medidas críticas.

Caso A.1

Conjuntos críticos = {P3, T3-4}, {Q3, U3-4}, {P9, T4-7, T9-11}, {Q9, U4-7, U9-11}

Caso A.2

Conjuntos críticos = {P2, P3, P4, T4-7, T7-9}, {Q2, Q3, Q4, U4-7,

U7-9}

Caso A.3

Conjuntos críticos = {P7, T7-8}, {Q7, U7-8}, {P1, P2, P3, P4, T1-2}, {Q1, Q2, Q3, Q4, U1-2}

Caso B.1

Conjuntos críticos = {P25, P26}, {Q25, Q26}

Caso B.2

Conjuntos críticos = {P6, T6-9}, {Q6, U6-9}, {P14, T12-14}, {Q14, U12-14}, {P22, T10-21}, {Q22, U10-21}, {P25, P26}, {Q25, Q26}, {T19-20, T10-20}, {U19-20, U10-20}, {T15-23, T23-24}, {U15-23, U23-24}

Caso Sul 121

Conjuntos críticos = {P12, P13, P35, T2-4, T2-12, T21-51, T35-64, T34-35, T35-58, T35-51, T36-37}, {P14, T21-38}, {P17, T15-26, T19-20, T20-21, T18-19, T17-18}, {P39, P42, P45, P48, T21-39, T42-43, T45-46}, {P40, P41}, {P65, P66, T66-75}, {P80, T5-82, T80-118, T5-11, T116-119, T105-119, T107-108, T105-107, T82-116, T95-103, T93-95, T93-94, T81-94}, {P86, P87, P88, P89, P90, T85-86}, {P99, P100, P102, T98-99}, {P110, P111, P112, P113, T77-110}, {P117, T116-117}, idem para a parte reativa.

Caso Sul 74

Se ao conjunto de telemedidas forem adicionadas as pseudomedidas críticas P19 e Q19, o sistema passa a ser observável, apresentando as seguintes medidas e conjuntos críticos:

Medidas Críticas = {P19, Q19}

Conjuntos críticos = {P1, T1-22}, {P2, T2-22}, {P5, T5-28}, {P6, T6-31, T6-23}, {P7, T7-27, T7-26}, {P8, T8-19}, {P12, T12-21}, {Pa15, T15-30}, {P58, T58-59}, {P60, T60-61, T60-62, T60-63}, {P69, T69-73, T69-74}, {Q5, U5-28}, {Q6, U6-31, U6-36}, {Q7, U7-27, U7-26}, {Q8, U8-19}, {Q12, U12-21}, {Q15, U15-30}; {Q58, U58-59}, {Q60, U60-61, U60-63}; {Q69, U69-73, U69-74}.

Conjunto 25-crítico = {V1 a V12, V14 a V18, V24, V33, V34, V40, V43, V48, V52, V56, V67}.

7.3 Análise dos Resíduos Normalizados

Como foi visto na subseção 2.4 do capítulo II, as medidas críticas são possuidoras de resíduos necessariamente zero e os elementos pertencentes a um mesmo conjunto crítico apresentam resíduos normalizados iguais.

Assim, se os planos de medição forem submetidos a um estimador de estados com capacidade de cálculo dos resíduos normalizados para as quantidades medidas é possível, através da análise destes resíduos confirmar a veracidade dos resultados obtidos pelos procedimentos topológicos tratados neste trabalho.

Para esta análise são considerados os casos referentes ao sistema de 14 e 30 barras do IEEE, ou seja, caso A.1, A.2, A.3, B.1 e B.2.

No que diz respeito às medidas críticas, os 5 casos submetidos ao estimador de estados confirmam os resultados topológicos através do cálculo em ponto flutuante dos resíduos.

A Tabela 7.3.1 apresenta os resíduos normalizados relativos às medidas pertencentes aos respectivos conjuntos críticos existentes em cada um dos casos estudados.

Tabela 7.3.1 Resíduos Normalizados para Medidas Pertencentes a Conjuntos Críticos

Resíduos Normalizados Para Conjuntos Críticos		
Casos	Medidas Ativas	Medidas Reativas
A. 1	P3: 0,04241 T3-4: 0,03830 P9: 1,418 T4-7: <u>0,046</u> T9-10: 1,418	Q3: 0,1573 U3-4: 0,1619 Q9: 15,10 U4-7: 15,04 U9-10: 15,10
A. 2	P2: 1,1460 P3: 0,9713 P4: 1,0553 T4-7: 1,0559 T7-9: 1,0212	Q2: 0,2140 Q3: 0,2799 Q4: 0,2414 U4-7: 0,2344 U7-9: 0,2933
A. 3	P1: 1,0860 P2: 0,9507 P3: <u>0,5581</u> P4: <u>0,7279</u> T1-2: 1,0770	Q1: 0,3841 Q2: 0,4974 Q3: 0,5404 Q4: 0,5153 U1-2: 0,4103
	P7: 0,241 T7-8: 0,241	Q7: 0,02943 U7-8: 0,02943
B. 1	P25: 0,06329 P26: 0,06172	Q25: 0,05144 Q26: 0,05026
B. 2	P6: 0,4851 T6-9: 0,4851	Q6: 0,003305 U6-9: 0,003305
	P14: 0,05612 T12-14: 0,05442	Q14: 0,00271 U12-14: <u>0,01358</u>
	P22: 0,08001 T10-21: 0,07845	Q22: 0,05182 U10-21: 0,05416
	P25: 0,01673 P26: 0,01676	Q25: 0,001304 Q26: 0,001555
	T19-20: 0,06025 T10-20: 0,07297	U19-20: 0,05235 U10-20: 0,03253
	T15-23: 0,002733 T23-24: 0,002362	U15-23: 0,03543 U23-24: 0,03541

Analisando-se a tabela 7.3.1, nota-se que os resíduos normalizados (rn) pertencentes a um mesmo conjunto crítico são aproximadamente iguais, o que era de se esperar. Contudo, em alguns casos percebe-se uma certa discrepância entre os mesmos.

Seja por exemplo o caso A.1. O rn referente à medida de fluxo T4-7 difere bastante dos correspondentes P9 e T9-10. A título de verificação deste resultado numérico, o qual não considera a medida T4-7 como integrante do conjunto crítico, retirou-se esta medida do plano de medição e procedeu-se novamente à estimação de estados. Além das medidas críticas existentes antes da remoção de T4-7, passam a ser críticas as medidas P9 e T9-10. Este resultado numérico confirma o topológico, o qual classifica as medidas T4-7, P9 e T9-10 como formadoras de um conjunto crítico. Ou seja, confirma-se a veracidade dos resultados obtidos topologicamente.

Observa-se também em outros casos (A.3 e B.2) certas discrepâncias entre os resíduos normalizados relacionados a conjuntos críticos. Remoções semelhantes àquelas realizadas no Caso A.1 foram executadas, sendo mais uma vez confirmados os resultados topológicos, conforme ocorreu no caso A.1. No entanto, salienta-se a importância de melhor investigar as causas das discrepâncias detectadas.

Estes exemplos ilustram a dificuldade do uso de métodos numéricos baseados na simples comparação dos resíduos normalizados para a determinação de conjuntos críticos, pela falta de credibilidade de seus resultados. Em contrapartida, os resultados oriundos de métodos topológicos mostram-se sempre coerentes e confiáveis concluindo-se então pela preferência em sua utilização.

7.4 Análise dos Resultados de Criticidade das Medidas de Tensão

No capítulo V, é introduzido um procedimento para determinação de conjuntos k-críticos formados apenas por medidas de módulo de tensão. Com o intuito de ratificar os resultados apresentados por este procedimento faz-se uso de um plano de medição cuja parte ativa é idêntica à do caso A.1 e cuja parte reativa é a seguinte:

Conjunto de barras monitoradas por medidas de injeção de potência reativa = {1, 3, 5, 8, 12}

Conjunto de linhas monitoradas por medidas de fluxo de potência reativa = {1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 13, 16, 18}

Conjunto de barras monitoradas por medidas de módulo de tensão = {1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 12, 13, 14}

Este plano de medição é observável pois, é possível a obtenção de uma A.G.O. formada apenas por medidas da parte ativa e outra formada apenas por medidas da parte reativa.

Submetendo-se este plano de medição ao procedimento VCRT (seção 5.4), o qual determina conjuntos k-críticos de módulos de tensão, obtém-se os seguintes resultados:

Medidas críticas = {V9, V14}

Conjunto 7-crítico = {V1, V2, V3, V4, V5, V6, V12, V8}

Se a medida V14 for retirada do plano de medição e este for submetido a um estimador de estados, verifica-se que este não obtém convergência. Ou seja, o plano não é observável e a medida V14 é realmente crítica.

Porém, se a medida V9 for retirada e o plano de medição for submetido a um estimador, verifica-se que o processo iterativo converge. Este resultado não é condizente com o esperado, pois a retirada de V9 deveria tomar o sistema não-observável, tal como o sucedido com a medida V14.

As mesmas medidas são novamente removidas e os correspondentes planos de medição são submetidos a um Estimador de Estados Desacoplado Rápido [25]. Tanto para a retirada de V9 quanto de V14 o estimador desacoplado não obtém convergência. Este resultado é esperado, tendo em vista o fato de que o procedimento topológico utilizado para determinação de conjuntos críticos ser baseado em um modelo que considera o desacoplamento entre a parte ativa e reativa. Entretanto, dependendo do sistema utilizado este desacoplamento pode não ser perfeito, caso algumas das premissas básicas para seu uso não sejam satisfeitas. O sistema IEEE de 14 barras utilizado para testar o desempenho do procedimento VCRT, por exemplo, não cumpre inteiramente a hipótese básica do desacoplamento (alta relação X/R das linhas de transmissão). A Tabela 7.4.1 apresenta as relações X/R cujos valores são menores que 3.

Tendo em vista a existência de baixas relações X/R, informações através da parte ativa podem possibilitar a estimação de estados cuja parte reativa se mostra deficiente. Ou seja, constata-se um certo acoplamento entre as medidas ativas e reativas.

**Tabela 7.4.1-Relações X/R de Algumas Linhas de Transmissão
do Sistema IEEE-14 Barras**

Linha i-j	X/R
3 - 4	2,550
6 - 11	2,090
6 - 12	2,080
6 - 13	1,969
9 - 10	2,656
9 - 14	2,120
10 - 11	2,320
12 - 13	0,900
13 - 14	2,030

Este comportamento foi observado neste trabalho apenas para medidas críticas de módulo de tensão. Deste modo, conclui-se que o procedimento para análise da criticidade das medidas de módulo de tensão é conservativo, pois pode determinar como críticas medidas que, na realidade, não o são.

7.5 Ganhos Computacionais Obtidos pelas Alterações Implementadas no Procedimento Enumerativo que Determina Medidas e Conjuntos Críticos

As alterações implementadas no procedimento enumerativo que determina medidas e conjuntos críticos, descritas no capítulo V, implicam em geral numa significativa redução no tempo computacional despendido para a execução do programa correspondente.

A primeira alteração realizada é a utilização da propriedade da reciprocidade. Esta propriedade apenas afeta o número de recorrências ao procedimento OBSERV ao se determinar conjuntos críticos. A tabela 7.5.1 compara a eficiência computacional do procedimento enumerativo originalmente proposto [10] com o mesmo acrescido da propriedade da reciprocidade. Esta tabela refere-se apenas à determinação de conjuntos críticos.

Tabela 7.5.1 Comparação da Eficiência Computacional Com e Sem a Exploração da Propriedade da Reciprocidade

DETERMINAÇÃO DE CONJUNTOS CRÍTICOS					
C A S O	Número de Chamadas ao Proc. OBSERV		Tempo de Computação (s)		Redução (%)
	Sem Reciproc.	Com Reciproc.	Sem Reciproc.	Com Reciproc.	
A.1	280	163	0,6332	0,4166	34,21
A.2	112	22	0,5199	0,1099	78,86
A.3	140	25	1,2233	0,2466	79,84
B.1	1380	1016	8,1861	6,0629	25,94
B.2	1260	1230	30,5115	29,8150	2,28
Sul 121	8349	521	1276,5000	113,8000	91,20

Observa-se que, em alguns casos, a redução é de até 79% e em outros de apenas 2,8%. Esta discrepância é devida ao plano de medição analisado, ao número de barras do sistema e principalmente ao número e tamanho dos conjuntos críticos existentes no plano de medição.

A atualização do grafo de medição não proporciona uma diminuição significativa de tempo computacional em comparação à versão do procedimento que incorpora a reciprocidade. No entanto, esta alteração fornece meios de se melhor analisar o grafo de medição recém-atualizado. Desta análise, conforme a situação, é possível se concluir expeditamente a respeito da observabilidade do plano atualizado. Esta análise expedita proporciona uma diminuição adicional do número de chamadas ao procedimento OBSERV.

As Tabelas 7.5.2 e 7.5.3 fornecem tanto a redução de tempo quanto a de chamadas ao procedimento OBSERV, devido a implementação da análise expedita da observabilidade. A confrontação de tempos se dá entre os procedimentos que exploram a reciprocidade e aqueles que analisam o grafo de medição atualizado.

Tabela 7.5.2- Comparação da Eficiência Computacional do Método Enumerativo que determina Medidas críticas Com e Sem a Utilização da Análise Expedita da Observabilidade

C A S O	M E D I D A S C R Í T I C A S					
	Número de Chamadas ao Proc. OBSERV			Tempo de Computação (s)		Redução %
	Sem Anal. Exp.	Com Anal. Exp.	Red %	Sem Análise Expedita	Com Análise Expedita	
A.1	13	3	76,9	0,0299	0,0233	22,00
A.2	13	9	30,7	0,0666	0,0533	19,90
A.3	13	9	30,7	0,1066	0,0866	18,70
B.1	29	14	51,7	0,6832	0,3966	41,90
B.2	29	4	86,2	0,1666	0,0799	52,00
SUL 121	120	104	13,3	29,9150	25,6940	14,10

Tabela 7.5.3 Comparação da Eficiência Computacional do Método Enumerativo que Determina Conjuntos Críticos Com e Sem a Utilização da Análise Expedita da Observabilidade

C A S O	C O N J U N T O S C R Í T I C O S					
	Número de Chamadas ao Proc. OBSERV			Tempo de Computação (s)		Redução %
	Sem Anal. Exp.	Com Anal. Exp.	Red. %	Com Análise Expedita	Sem Análise Expedita	
A.1	163	32	80,3	0,4166	0,2933	29,60
A.2	22	19	13,6	0,1099	0,1099	-
A.3	25	14	44,0	0,2466	0,2199	10,80
B.1	1230	820	33,3	29,8150	21,8700	26,60
B.2	1016	127	87,5	6,0629	3,9964	34,00
SUL 121	521	448	14,0	113,8000	99,4940	12,50

Uma explanação adicional pertinente à redução dos tempos de processamento se faz necessária, exemplificando-a através do caso B.2. Este apresenta significativa redução do número de chamadas ao procedimento OBSERV de 1016 para 127, ou seja, uma redução de 87,5%, enquanto que a de tempo é de apenas 34,0%. Isto se deve ao fato de que grande parte do tempo total explicitado na Tabela 7.5.2 é dispendida para a atualização do grafo de medição. Esta porção de tempo se mantém constante, pois o número de vezes que se reestrutura o grafo de medição é o mesmo da versão com a qual a confrontação da Tabela 7.5.2 é feita. Por isto, conclui-se que não é de se esperar uma proporcionalidade entre as reduções de tempo e de chamadas ao procedimento referido [11].

A maior ou menor eficiência computacional obtida através da propriedade e das estratégias adotadas depende portanto da configuração e grau de redundância do plano de medição que se está simulando.

7.6. Comparação entre Procedimento Enumerativo e Não-Enumerativo para Determinação de Medidas Críticas

A utilização do procedimento não-enumerativo para a determinação de medidas críticas, descrito na seção 5.4. e baseado na Teoria de Matrôides implica em um substancial ganho computacional. Para verificá-lo, seja a Tabela 7.6.1 que compara os tempos equivalentes à execução dos procedimentos enumerativos e não-enumerativos.

Tabela 7.6.1 Confrontação entre Tempo Computacional do proc. Enumerativo e Não-Enumerativo para a Determinação de Medidas Críticas

C A S O	Tempo para Determinação de Medidas Críticas		Redução %
	Proc. Enumerativo (s)	Proc. Nao-Enumerativo (s)	
A.1	0,0233	0,0133	42,90
A.2	0,0533	0,0166	68,80
A.3	0,0866	0,0299	84,60
B.1	0,3966	0,1599	59,60
B.2	0,0799	0,0566	29,10
SUL 121	25,69400	0,9866	96,10

Enquanto que para o método enumerativo se recorre várias vezes ao procedimento OBSERV (ver Tabela 7.5.2), o método não-enumerativo só o faz uma única vez para todo e qualquer caso. Este fato é evidenciado pelas reduções de tempo observadas na Tabela 7.6.1.

Um ganho computacional relevante também é observado pela utilização do procedimento não-enumerativo quando da determinação conjuntos críticos conforme ilustra a Tabela 7.6.2 .

Tabela 7.6.2-Comparação da Eficiência Computacional Com e Sem a Utilização do Método Não-Enumerativo na Determinação de Conjuntos críticos

C A S O	DETERMINAÇÃO DE CONJUNTOS CRÍTICOS				
	Número de Chamadas ao Proc. OBSERV		Tempo Computacional (s)		R E D. %
	Util. Proc. Enumer.	Util. Proc. Nao-Enumer.	Util. Proc. Enumer.	Util. Proc. Nao-Enumer.	
A.1	32	17	0,2933	0,2499	14,7
A.2	19	4	0,1099	0,0933	15,1
A.3	14	5	0,2199	0,1766	19,6
B.1	820	41	21,8700	7,1490	67,3
B.2	127	40	3,9964	0,2499	93,7
SUL 121	448	18	99,4940	22,0000	77,8

Os seis casos anteriormente considerados são simulados pelos procedimentos que determinam medidas e conjuntos críticos apenas para a parte ativa, já que as medidas de fluxo e injeção são tomadas aos pares (ativo/reactivo), considerando-se uma medida de tensão na barra de referência.

Já o sistema SUL 74 não apresenta simetria entre a parte ativa e reativa, devido à presença de várias das medidas de módulos de tensão (ver Apêndice II). Para este caso, é necessário tratar a parte P- δ e Q-V separadamente. Outra peculiaridade deste sistema é que o mesmo é não-observável, sendo necessária a introdução de pseudomedidas críticas a fim de restaurar a observabilidade (assunto da seção seguinte).

A Tabela 7.6.3 e 7.6.4 apresentam os tempos envolvidos para a determinação de medidas e conjuntos críticos, respectivamente, desconsiderando-se o dispendido para a alocação das pseudomedidas críticas introduzido no plano de medição.

Tabela 7.6.3- Comparação da Eficiência Computacional entre o Processo Enumerativo e o Não-Enumerativo para Determinação de Medidas Críticas

C A S O	DETERMINAÇÃO DE MEDIDAS CRÍTICAS				
	Número de Chamadas ao Proc. OBSERV		Tempo Computacional (s)		R E D. %
	Proc. Enumer.	Proc. Não Enumer.	Proc. Enumer.	Proc. Não Enumer.	
SUL74 (P-δ)	2	1	1,5799	1,4132	10,5
SUL74 (Q-v)	2	1	1,8832	1,6566	12,0

Tabela 7.6.4- Comparação da Eficiência Computacional Entre a Utilização ou Não do Procedimento Enumerativo na Determinação de Conjuntos Críticos

C A S O	DETERMINAÇÃO DE CONJUNTOS CRÍTICOS				
	Número de Chamadas ao Proc. OBSERV		Tempo Computacional (s)		R E D. %
	Proc. Enumer.	Proc. Não Enumer.	Proc. Enumer.	Proc. Não Enumer.	
SUL74 (P-δ)	213	197	374,93	280,98	25,0
SUL74 (Q-v)	240	226	503,45	374,94	25,5

Conforme as tabelas 7.6.3 e 7.6.4, observa-se uma redução pequena de tempo computacional em relação à obtida pelo caso SUL 121. Contudo, este fato pode ser compreendido através da análise do número de chamadas ao procedimento OBSERV.No caso do sistema SUL 74 estes números, tanto para o método enumerativo quanto para o não-enumerativo,têm a mesma ordem de

grandeza. Por exemplo, enquanto que o método enumerativo é submetido 213 vezes ao procedimento OBSERV, o método não-enumerativo é submetido 197 vezes ao procedimento OBSERV e ao que determina medidas críticas. Portanto, é de se esperar uma equivalência entre os respectivos tempos computacionais.

Cabe salientar que esta equivalência entre o número de chamadas está fortemente ligada à redundância do plano de medição, isto é, a existência de poucas medidas e conjuntos críticos.

7.7 Recuperação de Planos de Medição Deficientes

7.7.1 Alocação de Pseudomedidas Críticas

A fim de se testar o procedimento que aloca pseudomedidas críticas (cap. V), utilizam-se o plano de medição do sistema SUL 74 e outros dois planos não-observáveis dos sistemas-teste de 14 e 30 barras. Estes dois últimos sistemas, designados por A.4 (14 barras) e B.3 (30 barras) são apresentados no Apêndice II e os conjuntos de pseudomedidas a eles incorporadas são a seguir apresentadas.

Caso A.4 (Sistema-teste de 14 barras do IEEE)

Conjunto de pares de pseudomedidas de injeção = {10, 7}

Conjunto de pares de pseudomedidas de fluxo = {1, 2, 3, 6, 7, 9, 11, 14, 17, 19}

Caso B.3 (Sistema-teste de 30 barras do IEEE)

Conjunto de pares de pseudomedidas de injeção = {6, 11, 13, 14, 25}

SUL 74 (Sistema da Região Sul de 74 barras)

Conjunto de pares de pseudomedidas de injeção = {19, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 47, 59, 61, 62, 63, 72, 73, 74}

Conjunto de pares de pseudomedidas de fluxo = {36}

A Tabela 7.7.1 apresenta as pseudomedidas críticas alocadas para os casos A.4, B.3 e SUL 74, o número de chamadas ao procedimento não-enumerativo que determina medidas críticas (MDCRIT), o qual é também utilizado aqui, e o tempo gasto para esta alocação.

Tabela 7.7.1 - Alocação de Pseudomedidas Críticas

C A S O	PSEUDOMEDIDAS CRÍTICAS		Número de Chamadas a MDCRIT	Tempo de execução (s)
	De Fluxo	De Injeção		
A.4	T11-6, T14-8, U11-6, U14-8	P10, Q10, P7, Q7	6	0,14666
B.3	-	P11, P13, P25, Q11, Q13, Q25	1	0,07666
SUL 74	-	P19, Q19	1	1,49990

7.7.2 Análise do Espalhamento de Erro Grosseiro Presente em Medidas Críticas

A introdução de pseudomedidas em plano de medição deficiente engloba a introdução de quantidades menos confiáveis que as telemidas. Estas quantidades não devem afetar as demais medidas do sistema. Para que isto ocorra, as pseudomedidas alocadas devem ser críticas (seção 2.5). Estas, como já mencionadas no Cap. II, não interagem com as demais medidas do sistema, de modo que não há contaminação de seus erros sobre as outras medidas e assim sobre os estados por elas estimados.

Apesar desta característica das medidas críticas, é possível se determinar um conjunto de quantidades estimadas afetadas por medidas (pseudomedidas) críticas espúrias. A propriedade da seção 2.4 do Cap. II trata da determinação deste conjunto, cujo enunciado é o seguinte:

Propriedade 3 - Considere um sistema observável. Seja T o conjunto de quantidades estimadas afetadas por uma medida crítica errônea. Suponha que a medida crítica é eliminada do conjunto de medidas. Então, os elementos em T são quantidades que, se medidas e acrescentadas individualmente ao plano de medição, incrementariam de uma unidade o posto de H. [4].

Conforme esta propriedade, é possível saber quais as quantidades (injeção nas barras e/ou fluxo nas linhas) que, ao serem calculadas a partir dos estados estimados, são afetadas pelas medidas críticas portadoras de erros grosseiros.

A verificação desta propriedade pode ser feita através da introdução proposital de erro em uma medida sabidamente crítica de um plano de medição qualquer. Por exemplo, seja o caso A.2 em que uma de suas medidas críticas é a de fluxo de potência ativa na linha 7-8 (T7-8).

A figura 7.1 apresenta a árvore geradora observável formada pelo plano de medição P- δ do caso A.2. Segundo esta figura, vê-se que as quantidades que se medidas recuperariam a observabilidade perdida pela retirada de T7-8 são as injeções nas barras 7 e 8.

Foi introduzido um erro de 30 desvios-padrão em T7-8 e submeteu-se o plano a um estimador. Verifica-se que realmente apenas os valores referentes à injeção nas barras 7,8, e ao fluxo na linha 7-8 possuem seus valores discrepantes em relação à estimação sem a introdução de erro grosseiro em T7-8.

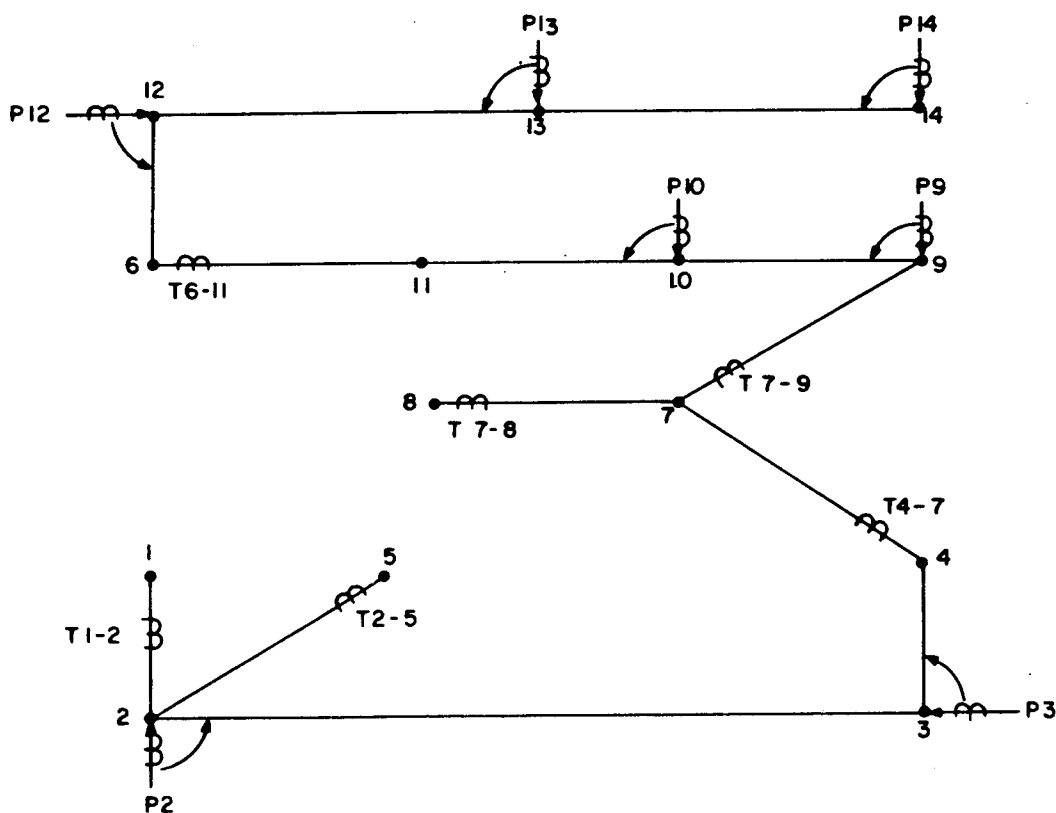


Figura 7.1 Árvore Geradora Observável Formada Apenas pelo Plano de medição P- δ

Conclui-se então que a opção de se alocar pseudomedidas críticas é eficaz, pois além de se limitar a região afetada pela sua introdução é também possível discriminar qual é esta região.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

8.1 Conclusões

Em sua primeira parte, este trabalho apresenta diversas aplicações da Teoria de Matróides a problemas relacionados à estimação de estados em Sistemas Elétricos de Potência. Especificamente, descrevem-se as ferramentas fornecidas por esta teoria, para a determinação de observabilidade, determinação de medidas críticas e alocação de pseudomedidas críticas.

O procedimento que analisa observabilidade proposto em [3], [5] é aqui detalhadamente descrito, pois artigos que tratam dele não fazem menção explícita a seus fundamentos. O desempenho deste procedimento já é sabidamente conhecido pela literatura. Caracteriza-se pela rapidez de execução, resultante da não utilização de cálculos em ponto flutuante e pela correção de seus resultados.

Este trabalho apresenta também um método enumerativo para determinação de medidas e conjuntos críticos, proposto em [10] e baseado no procedimento que analisa a observabilidade. As diversas alterações nele implementadas (cap. V) melhoram substancialmente sua eficiência computacional, além de torná-la aplicável a qualquer situação realística de operação. Ou seja, é possível o estudo de planos que não apresentam simetria entre as partes P- δ / e Q-V e de linhas monitoradas por medidas de fluxo em ambas as barras terminais.

Todos os testes realizados com o intuito de verificar os resultados advindos do uso do desacoplamento P- δ /Q-V lograram êxito. Ou seja, os resultados obtidos pelos métodos topológicos mostraram-se corretos e confiáveis. Estes foram submetidos à verificação mediante o processamento tanto de medidas ativas quanto reativas por um estimador de estados. A única exceção reside na determinação da criticidade das medidas de módulos de tensão, que em certos casos pode se mostrar conservativa. Esta conservatividade pode ser devida ao não cumprimento de uma das condições

necessárias à utilização do desacoplamento ativo e reativo, segundo a qual as relações X/R (reatância/resistência) das linhas de transmissão devem ser relativamente altas (>3).

O método não enumerativo para determinação de medidas críticas baseado no procedimento que determina elementos críticos em interseção de matróides mostra-se bastante eficiente. A sua fundamentação matemática assegura que todas as medidas críticas são determinadas. Além dos resultados confiáveis, o método apresenta ainda tempos de execução compatíveis com a operação em tempo real. Esta assertiva é comprovada através de análise de simulações de sistemas realísticos da região sul-brasileira.

O método que aloca pseudomedidas críticas em planos de medição deficientes também apresenta um bom desempenho. Ele assegura a introdução de pseudomedidas críticas e apresenta rapidez na execução, principalmente no que tange à operação em tempo real. Este método, também baseado na Teoria de Matróides, pode ser na verdade interpretado como uma extensão do método não-enumerativo que determina medidas críticas.

8.2 Sugestões para futuros trabalhos

Para dar continuidade ao trabalho, os seguintes itens são sugeridos:

1) Elaboração de um procedimento não-enumerativo baseado na Teoria de Matróides que determine conjuntos críticos de medidas existentes em planos de medição submetidos à estimação de estados. Um método desta natureza tende a ser mais eficiente computacionalmente em relação ao descrito neste trabalho, pois não recorre repetidas vezes ao procedimento que determina medidas críticas e que analisa a observabilidade.

2) Elaboração de método numérico para a determinação de conjuntos críticos, ou seja, de método que se utilize das propriedades numéricas destes conjuntos. Resultados numéricos podem ser utilizados para validação dos obtidos topologicamente, além de possibilitar uma confrontação dos tempos computacionais dispendidos por ambos os procedimentos.

3) Estudo sobre o efeito de se utilizar o desacoplamento $P-\delta/Q-V$ na determinação de medidas e conjuntos críticos.

4) Particularmente, aprimoramento do desempenho computacional da rotina encarregada da montagem e atualização do grafo de medição, ZM. O

procedimento que determina medidas e conjuntos críticos recorre repetidas vezes a esta rotina. Assim sendo, a percentagem de tempo dispendido apenas na montagem e atualização de ZM é considerável. Isto justifica uma reavaliação da estrutura de armazenamento de ZM bem como do processo que o atualiza.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] K.A. CLEMENTS & B.F. WOLLEMBERG. "An Algorithm for Observability Determination in Power System State Estimation". Apresentado no IEEE PES Summer Meeting, San Francisco, Jul. 1975.
- [02] G.R. KRUMPHOLZ, K.A. CLEMENTS & P.W. DAVIS. "Power System Observability: A Practical Algorithm Using Network Topology". IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-99, N: 7, Jul/Aug. 1980, pp: 1534-1542.
- [03] A.J.A. SIMÕES COSTA. "Power System State Estimation. Orthogonal Methods For Estimation and Techniques For Topological Observability". Tese de Ph.D., University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 1981.
- [04] T. Van CUTSEM. "Power System Observability and Related Functions: Derivation of Appropriate Strategies and Algorithms". Electrical Power and Energy Systems, Vol. 7, 1985, pp: 175 - 187.
- [05] A.J.A. SIMÕES COSTA & A. MANDEL. "A Abordagem Topológica para Observabilidade de Sistemas de Potência: Teoria e Um Algoritmo". Rev. SBA: Controle e Automação, Vol. 1, 1986, pp: 59-71.
- [06] K.A. CLEMENTS, G.R. KRUMPHOLZ & P.W. DAVIS. "Power System State Estimation Residual Analysis: An Algorithm Using Network Topology". IEEE Trans. on PAS, Vol. AAS-100, N: 4, April 1981, pp: 1779-1787.
- [07] M. AYRES & P.H. HALEY. "Bad Data Groups in Power System State Estimation". IEEE Trans. on PAS, Vol. PWR-1, N: 3, Feb 1986, pp: 1-9.
- [08] L. MILI, T. Van CUTSEM & M. RIBBENS PAVELLA. "Hypothesis Testing Identification: A New Method for Bad Data Analysis in Power System State Estimation". IEEE Trans on PAS, Vol. PAS-103, N: 11, Feb. 1984, pp: 3239-3252.
- [09] K.A. CLEMENTS. Discussão de [08], 1984.
- [10] A.J.A. SIMÕES COSTA. "Determinação de Conjuntos Críticos de Medidas na Estimção de Estados em Sistemas de Potência". 7º Congr. Bras. de Automática, Vol. 2, Agosto 1988, pp: 830-836.
- [11] A.J.A. SIMÕES COSTA & T.S. PIAZZA. "Alterações Implementadas em Algoritmo Que Determina Medidas e Conjuntos Críticos em Planos de Medição". Relatório Interno GSP - 04/88-01, UFSC, Agosto 1988.

- [12] K.A. CLEMENTS, G.R. KRUMPHOLZ & P.W. DAVIS. "Power System State Estimation With Measurement Deficiency - An Algorithm That The Maximal Observable Subnetwork". IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-101, N: 9, Sep. 1982, pp: 3044 - 3052.
- [13] K.A. CLEMENTS, G.R. KRUMPHOLZ & P.W. DAVIS. "Power System Estimation With Measurement Deficiency: An Observability/ Measurement Placement Algorithm". IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS 102, N: 7, Jul. 1983, pp: 2012-2020.
- [14] A. BOSE & K.A. CLEMENTS. "Real Time Modeling of Power Networks". IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-75, N: 12, Dec. 1987, pp: 1607-1622.
- [15] E.A. dos SANTOS. "Estimação de Estados em Sistemas de Potência com Planos de Medição Deficientes". Dissertação de Mestrado - UFSC, Set. 1985.
- [16] S. AMARAL. "Métodos para Processamento de Erros Grosseiros Múltiplos em Estimadores de Estado Sequenciais-Ortogonais" Dissertação de Mestrado - UFSC, 1987.
- [17] F. HARARY & D. WESH. "Matroids Versus Graphs". Proc. of the Conference "The Many Facets of Graph Theory, Collection "Lecture Notes in Mathematics", Springer Verlag, 1969, pp: 155-170.
- [18] U.S.R. MURTY. "Notes on Matroid Theory, Part I: Basic Theory". Department of Combinatorics and Optimization, University of Waterloo.
- [19] H. WHITNEY. "On the Abstract Properties of Linear Dependence". American Journal of Mathematics - 57, 1935, pp: 509-518.
- [20] D. WELSH. "Matroid Theory". Academic Press, London, 1976.
- [21] J.A. BONDY & U.S.R. MURTY. "Graph Theory With Applications". The MacMillian Press Ltd, 1976.
- [22] E.L. LAWLER. "Matroid Intersection Algorithms". Mathematical Programming-9, 1975, pp: 31-56.
- [23] A. FRANK. "On Weighted Matroid Intersection Algorithm", Internal Report CORR 80-18, Dep. of Combinatorics and Optimization, University of Waterloo, Canada, April 1980.
- [24] N. XIANG, W. SHIYING & Y. ER-KENG, "A New Approach for Detection and Identification of Multiple Bad Data in Power System State Estimation ", IEEE Trans. on PAS&S , Vol. PAS-101, N: 2, 1982.

- [25] S.C. GUIMARÃES JR. "Técnicas Ortogonais Sequenciais Associadas a Estimadores de Estado Desacoplados Rápidos em Sistemas de Potência". Dissertação de Mestrado - UFSC, Dez. 1983.
- [26] G.W. STAGG, J.F. DOPAZO, O.A. KLITIN & L.S. van SLYCK. "Techniques for the Real-Time Monitoring of Power System Operations". IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-85, N: 4, Apr. 1970, pp: 545-555.
- [27] F.C. SCHWEPPE & J. WILDES. "Power System Static - State Estimation, Part I: Exact Model". IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-89, N: 1, 1970, pp: 120-125.
- [28] F.C. SCHWEPPE & D.B. ROM. "Power System Static - State Estimation, Part II: Approximate Model". IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-89, N: 1, 1970, pp: 125-130.
- [29] V.H. QUINTANA, A.J.A. SIMÕES COSTA & M. MIER. "Bad Data Detection and Identification Techniques Using Estimation Orthogonal Methods", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-101, N. 9, 1982, pp: 3356-3364.
- [30] A. MONTICELLI & F.F. WU, " Network Observability -. Theory ", Apresentado no IEEE PES Summer MEETING, Seattle, WA, Jul. 1984.
- [31] A. MONTICELLI & F.F. WU, " Network Observability: Identification of Observable Islands and Measurement Placement", Apresentado no IEEE PES Summer Meeting, Seattle, WA, Jul. 1984.

APÊNDICE I

IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DOS PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE DE OBSERVABILIDADE, PARA DETERMINAÇÃO DE MEDIDAS E CONJUNTOS CRÍTICOS E ALOCAÇÃO DE PSEUDOMEDIDAS CRÍTICAS

A.1.1 Procedimento para Análise de Observabilidade (OBSERV) [3], [5]

A implementação computacional do procedimento OBSERV, o qual faz análise de observabilidade e foi tratado no cap. IV, é aqui descrita tendo por base o fluxograma da Figura 4.4.2.

A entrada dos dados deste procedimento, assim como a dos demais adiante descritos, se caracteriza por vetores que retratam a topologia da rede e o plano de medição considerado.

O bloco 3 da Figura 4.4.2 corresponde à chamada da subrotina FORST. Esta subrotina encontra uma floresta F do subgrafo de medição composto apenas por arestas de fluxo. A floresta encontrada é armazenada em forma de uma lista de adjacência encadeada, sendo que a subrotina ADDT se encarrega de adicionar as devidas arestas a esta lista encadeada.

Caso a floresta composta por arestas de fluxo não seja uma árvore geradora é necessário que se utilize as arestas de injeção a fim de dar andamento ao procedimento. Para tanto a subrotina ADJSUB forma a lista de adjacência das barras do sistema, a qual é usada para a determinação das arestas de injeção do grafo de medição.

O grafo bipartido auxiliar Z_{ba} , definido no bloco 7, também é armazenado em uma lista encadeada, sendo que a adição de arestas a Z_{ba} é feita pela subrotina ADDG2.

No bloco 10, faz-se uso da subrotina TPATH, que verifica a existência de um caminho que conecte a e b em F e que fornece as arestas contidas neste caminho. Caso o mesmo exista, convenientes arestas são adicionadas a Z_{ba} , o que é feito pela subrotina ADDG2 como já mencionado (blocos 13 e 16).

A adição de uma aresta de injeção a F também é feita através da subrotina ADDT (bloco 18).

A busca do menor caminho U existente entre os subconjuntos X_1 e X_2 de Z_{ba} é feita pela subrotina $DYSTR$ A (bloco 21). Se este caminho for encontrado, a subrotina $ADDDEL$ se encarrega de adicionar a F as arestas localizadas nas posições ímpares de U e retirar de F as arestas localizadas nas posições pares de U .

A Figura A.1.1 apresenta o encadeamento das subrotinas utilizadas pelo procedimento $OBSERV$. Maiores detalhes a respeito das mesmas é encontrado em [3].

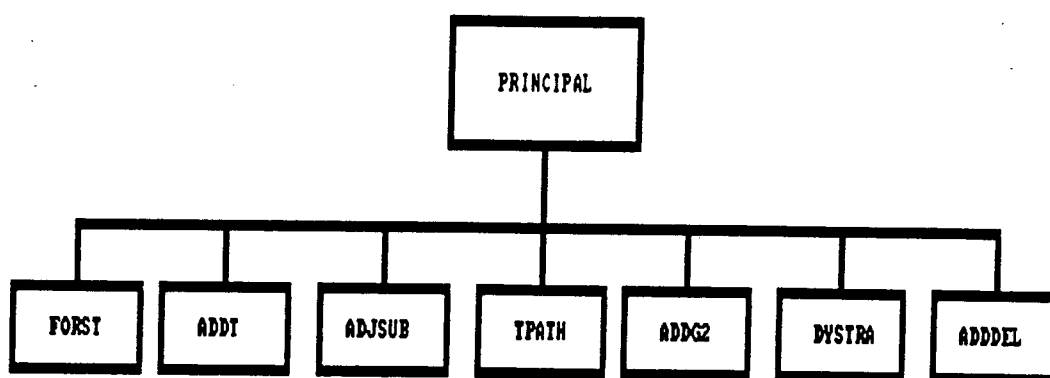


Figura A.1.1 - Encadeamento das subrotinas utilizadas pelo procedimento $OBSERV$

A.1.2 Procedimento Enumerativo para Determinação de Medidas e Conjuntos Críticos ($MEDCON$)

Tendo por base a Figura 5.3.1 do cap. V que apresenta o fluxograma geral do procedimento enumerativo para determinação de medidas e conjuntos críticos e os procedimentos da Figura 5.3.2, Figura 5.3.3 e Figura 5.3.4, passa-se à descrição das subrotinas utilizadas para a implementação destes procedimentos.

O procedimento $GRAMED$ apresentado na Figura 5.3.2 é implementado pela subrotina do mesmo nome, cuja função é atualizar o grafo de medição.

Já o procedimento $MDCRIT$ da Figura 5.3.3 é processado pelas subrotinas $INJCRT$ e $FLWCRT$, as quais determinam medidas críticas de injeção e fluxo, respectivamente.

A Figura 5.3.4 apresenta o procedimento para determinação de

conjuntos críticos, implementado pelas subrotinas PCINJ e PCFLOW. A subrotina PCINJ determina os elementos do conjunto crítico cujo pai é uma medida de injeção (ver seção 5.3.1), enquanto que a subrotina PCFLOW determina os elementos do conjunto crítico cujo pai é uma medida de fluxo.

Para a análise das medidas de módulo de tensão (ver seção 5.4.4), a subrotina VCRT determina os conjuntos k-críticos formados apenas por medidas desta natureza.

Estas subrotinas apresentam-se encadeadas conforme a Figura A.1.2.

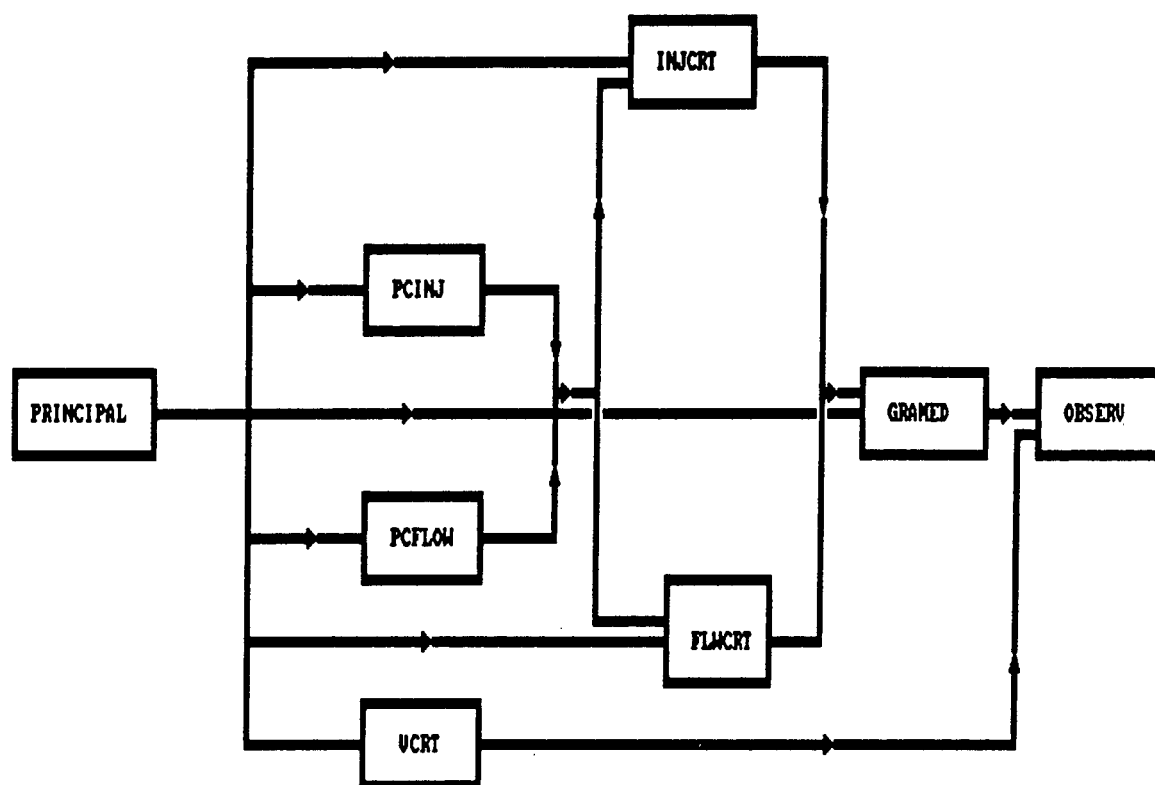


Figura A.1.2 - Encadeamento das Subrotinas Utilizadas pelo procedimento MEDCON

A.1.3 Procedimento Combinatório para Determinação de Medidas Críticas(MDCRIT)

Passa-se agora à descrição das subrotinas utilizadas para a execução do procedimento não enumerativo para determinação de medidas críticas (MDCRIT) apresentado na Figura 5.4.7.

Após terem sido determinados os vértices V1 e V2 do grafo bipartido auxiliar Zba (V1, V2) (blocos 5 a 7), passa-se à construção de suas arestas. O bloco 8 equivale à chamada da subrotina TREPTH. Esta subrotina tem a função de verificar a existência de um caminho entre os nós terminais da aresta correspondente a um dos vértices contidos em V2 na A.G.O. A subrotina TREPTH é chamada para cada um dos vértices de V2.

A adição de arestas a Zba (V1, V2) (blocos 9 e 11) é feita através da subrotina ADDG2, já mencionada na seção A.1.1.

Para a busca dos caminhos que conectam os conjuntos V1 e V2 (bloco 13) utiliza-se a subrotina BUSCA.

A Figura A.1.3 apresenta o encadeamento das subrotinas utilizadas pelo procedimento combinatório MDCRIT.

A utilização de MDCRIT para a determinação de conjuntos críticos é prevista na seção 5.4.3 do cap. V, que corresponde à substituição das subrotinas INJCRT e FLWCRT da Figura A.1.2 pela subrotina MDCRIT.

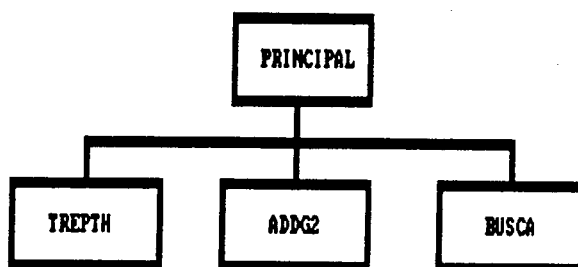


Figura A.1.3 - Encadeamento das Subrotinas Utilizadas pelo procedimento MDCRIT

A.1.4 Procedimento para Alocação de Pseudomedidas Críticas (ALOCA)

As subrotinas utilizadas para a implementação do procedimento ALOCA, o qual determina pseudomedidas críticas necessárias ao restabelecimento da observabilidade topológica, são aqui descritas segundo a Figura 6.1 do cap. VI.

A adição do conjunto de pseudomedidas disponível é adicionado ao plano de medição através da subrotina JUNTAR (bloco 2).

O novo conjunto de medidas incrementado pelas pseudomedidas é submetido à subrotina GRAMED que por sua vez aciona a subrotina OBSERV. Se com a adição das pseudomedidas for possível a formação de uma A.G.O., o passo seguinte consiste em retirar do conjunto de pseudomedidas todas as que não pertencem a A.G.O. (bloco 6). Este conjunto de pseudomedidas formado apenas por aquelas que integram a A.G.O. é novamente adicionada ao plano de medição pela subrotina JUNTAR (bloco 7).

O bloco 8 corresponde à utilização da subrotina MDCRIT a qual determina medidas críticas através de procedimento combinatório.

Caso haja alguma pseudomedida não-crítica, passa-se ao bloco 11. Este requer a busca em Zba (V1, V2) de um caminho entre X1 que pertence a V2 e de uma pseudomedida não-crítica y que pertence a V1. A fim de que se possa utilizar a subrotina DYSTRA, a qual busca caminho em Zba (V1, V2) entre dois subconjuntos X1 e X2, ambos pertencentes a V2, utiliza-se o artifício de se adicionar um nó fictício v3 a Zba (V1, V2), onde v3 pertence a V2. A subrotina ADDG2 se encarrega de adicionar a aresta $y \Rightarrow v3$ a Zba (V1, V2).

Assim, a subrotina DYSTRA é utilizada para a busca de um caminho entre X1 e v3, ambos pertencentes a V2, como requerido pela subrotina. De posse deste caminho, a subrotina ADDDEL se encarrega de efetuar as devidas substituições de arestas na A.G.O. (bloco 12).

A Figura A.1.4 apresenta o encadeamento das subrotinas acima descritas.

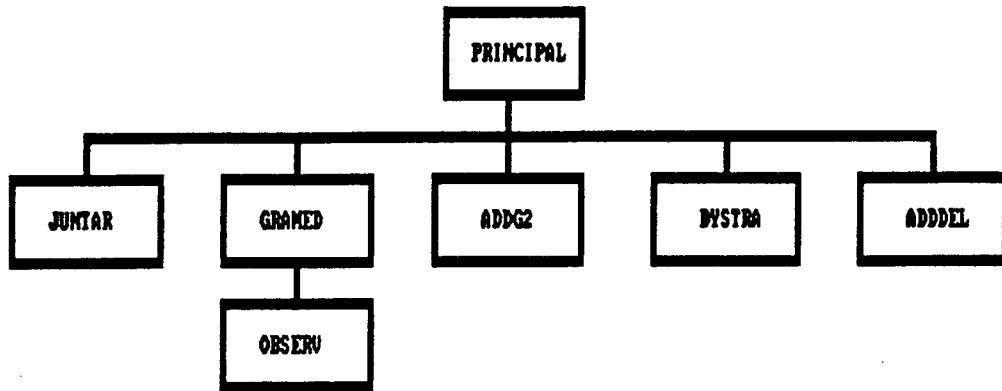


Figura A.1.4- Encadeamento das subrotinas utilizadas pelo procedimento ALOCA

APÊNDICE II

**DIAGRAMAS UNIFILARES E PLANOS DE MEDIÇÃO DOS SISTEMAS
DE POTÊNCIA UTILIZADOS PARA TESTES**

2.1 Sistema de Potência de 14 Barras

Trata-se de um Sistema-teste de 14 barras e 20 linhas do IEEE [2], cujo diagrama unifilar é mostrado na Figura A-2.1.

Os diferentes planos de medição simulados e referenciados no Capítulo VII estão descritos na Tabela A-2.1.

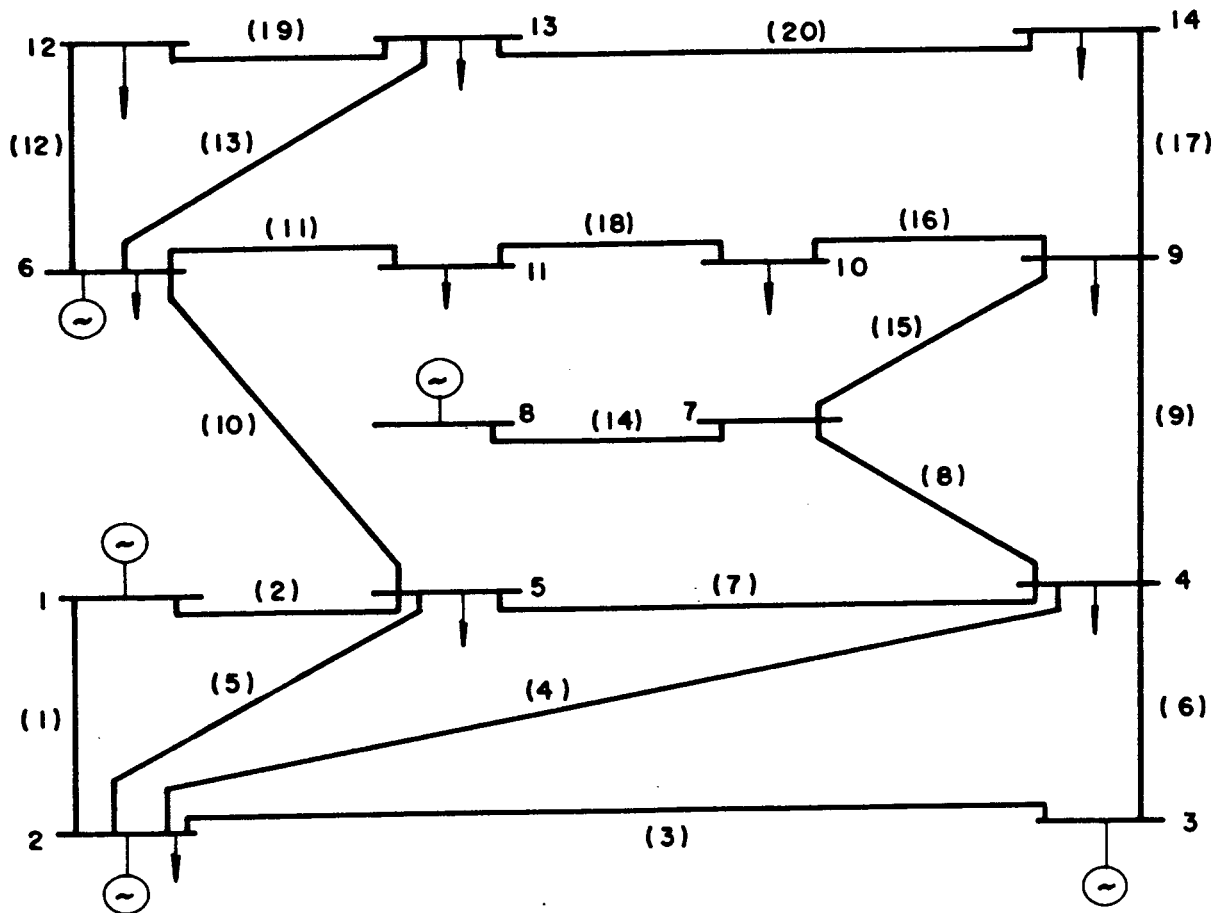


Figura A-2.1 - Diagrama Unifilar para o Sistema de 14 Barras

Tabela A-2.1 - Planos de Medição Utilizados no Sistema de 14 Barras

SISTEMA DE POTÊNCIA DE 14 BARRAS			
C A S O	Medidas de Injeção de Potência Ativa\Reativa nas Barras	Medidas de Fluxo de Pot. Ativa\Reativa em Um dos Term. das Linhas	Med. de Mod. de Tensão nas Barras
A.1	1, 2, 3, 5, 8, 9, 12 a 14	1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 13, 16, 17, 18, 20	1
A.2	1 a 4, 8, 10, 12 a 14	1, 2, 8, 11, 14, 15	1
A.3	1 a 7, 9, 10, 12, 13	1, 8, 9, 14, 15	1
A.4	1, 2, 3, 5, 8, 12, 13, 14	4, 5	1

2.2 Sistema de Potência de 30 Barras

Este Sistema-teste do IEEE [26] é constituído de 30 barras e 41 linhas, os planos de medições nele testados são mostrados na Tabela A-2.2. Seu diagrama unifilar é apresentado na figura A-2.2.

Tabela A-2.2 - Planos de Medição Utilizados no Sistema de 30 Barras

SISTEMA DE POTÊNCIA DE 30 BARRAS			
C A S O	Medidas de Injeção de Potência Ativa/Reativa nas Barras	Medidas de Fluxo de Pot. Ativa/Reativa em Um dos Term. das Linhas	Med. de Mod. de Tensão nas Barras
B.1	1 a 30	3, 6, 13, 14, 15, 16, 29, 30, 33, 35, 37, 39	1
B.2	1, 2, 5, 6, 11, 13, 14, 16 a 18, 22, 25 a 30	1 a 7, 9 a 12, 15, 17, 18, 19, 22 a 28, 30 a 33, 36 a 38, 40, 41	1
B.3	1, 2, 5, 16 a 18, 22, 27 a 30	1 a 7, 9 a 12, 15, 17 a 19, 22, 23 a 28, 30 a 33, 36 a 38, 40, 41	1

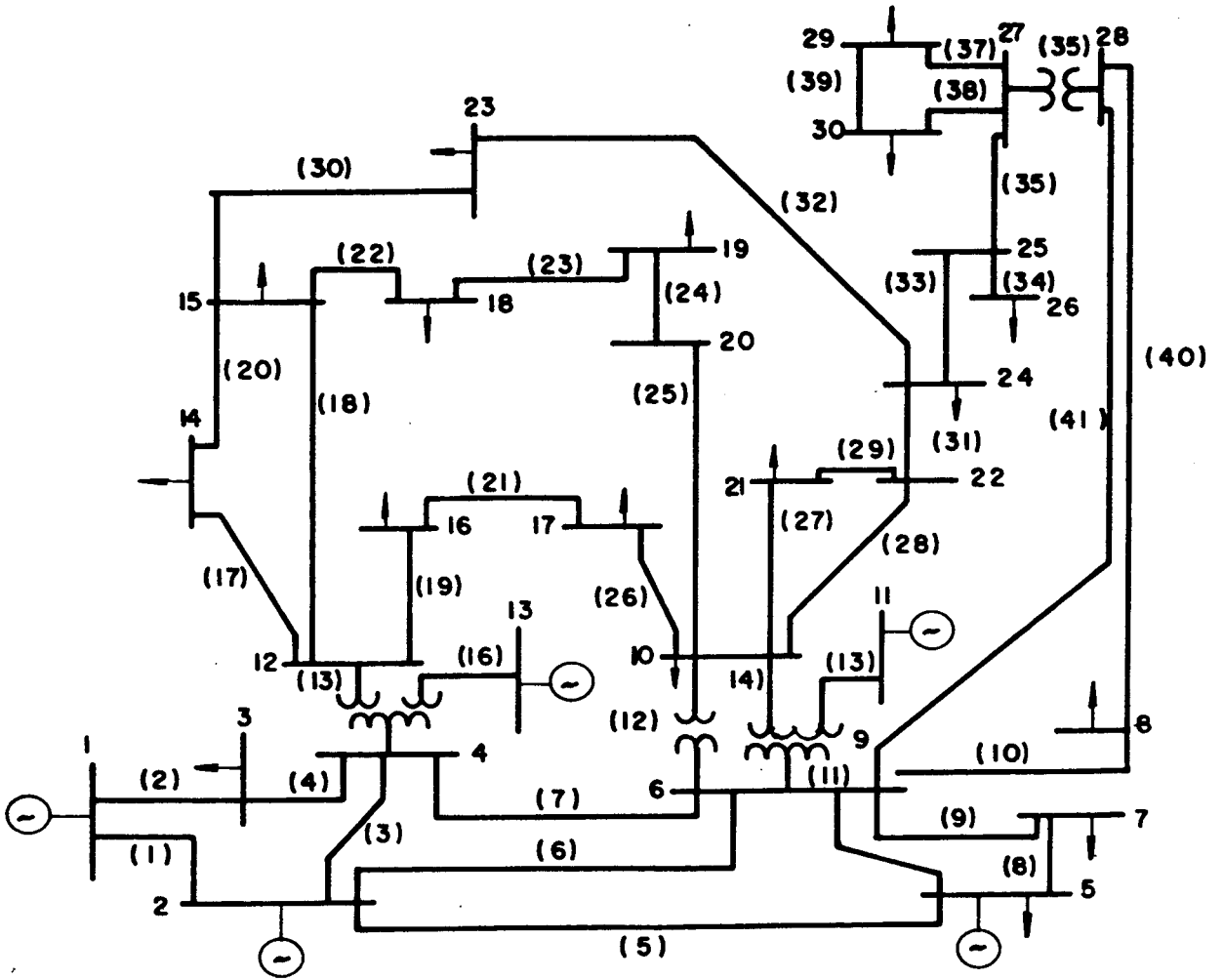


Figura A-2.2 - Diagrama Unifilar para o Sistema de 30 Barras

2.3 Sistema de Potência da Eletrosul- Celesc de 121 Barras

Este sistema foi obtido da rede elétrica interligada da Eletrosul e Celesc e é constituído de 121 barras e 133 linhas. Seu diagrama unifilar é mostrado na figura A-2.3.

O plano de medição nele testado é apresentado na Tabela A-2.3.

Tabela A-2.3 - Plano de Medição Utilizado no Sistema

SISTEMA ELETROSUL - CELESC (121 BARRAS)		
Medidas de Injeção de Potência Ativa\Reativa nas Barras	Medidas de Fluxo de Pot. Ativa\Reativa em Um dos Term. das Linhas	Med. de Mod. de Tensão nas Barras
1, 3, 5, 6, 8, 10, 12, 13, 14, 17, 22, 25, 28, 29, 31, 33, 35, 39 a 42, 45, 48, 49, 50, 53, 55, 56, 57, 60, 61, 62, 65, 66, 67 a 71, 73, 78, 79, 80, 82, 84, 86 a 92, 96, 97, 99 a 102, 104, 106, 109 a 114, 116, 117, 119, 120	5, 7, 9, 10, 12, 13, 16, 17, 18, 20, 23, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 35, 37, 39, 40, 44, 45, 46, 48, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 59, 60, 62, 67, 71, 77, 80, 84, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 96, 97, 98, 100, 101, 103, 115, 116, 119, 124, 126	1

Eletrosul-CELESC (121 Barras)

2.4 Sistema de Potência da Região Sul do Brasil (74 Barras)

O sistema de potência interligado da Região Sul do Brasil possui 74 barras e 92 linhas e é representado na Figura A-2.4. Neste diagrama, figuram as barras com nível de tensão acima de 230 kV.

O plano de medição apresentado na Tabela A-2.4 é uma representação realística do esquema de monitoração relativo a este sistema.

Tabela A-2.4 - Plano de Medição Utilizado no Sistema Sul do Brasil (74 Barras)

SISTEMA DA REGIÃO SUL DO BRASIL (74 BARRAS)			
Inj. de Potência Ativa\Reativa nas Barras	Fluxo de Potência Ativa\Reativa nos 2 Term. das Linhas	Fluxo de Pot. Ativa\Reativa em Um dos Terminais das Linhas	Módulos de Tensão nas Barras
1 a 8, 24, 32 a 46, 48 a 58, 60, 64 a 71	1 a 3, 6 a 15, 17, 18, 21, 22, 26, 27, 30, 32, 34, 38 a 70, 74 a 78, 80 a 86, 88, 92	4, 5, 16, 19, 20, 23, 24, 25, 28, 29, 31, 33, 35, 37, 71, 72, 73, 79, 87, 89, 90, 91	1 a 12, 14, 14 a 18, 24, 33, 34, 40, 43, 48, 52, 56, 67

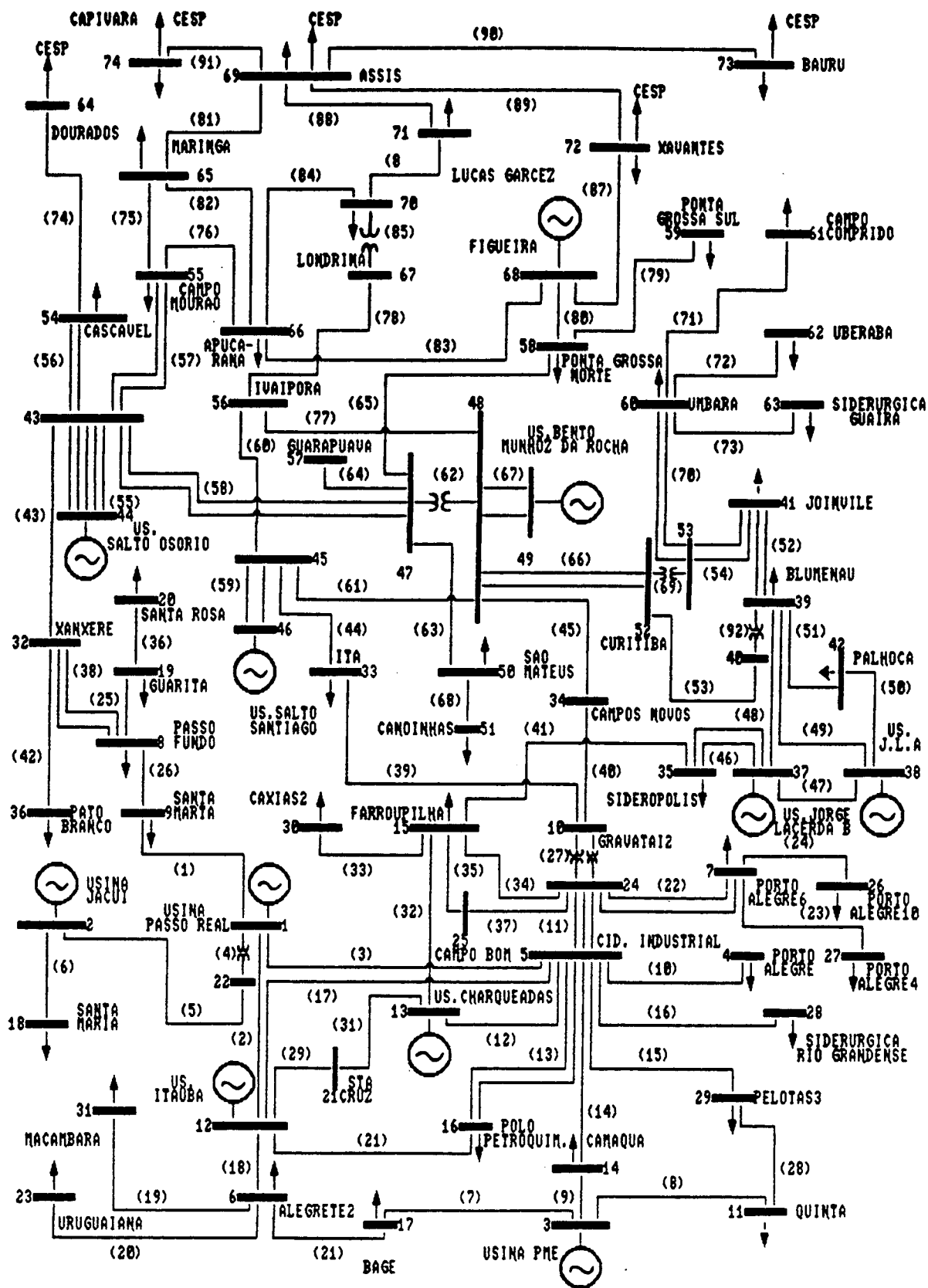


Figura A-2.4 Diagrama Unifilar para o Sistema interligado da região Sul-Brasileira(74 barras)