

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

**ERROS TOPOLÓGICOS NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA:
ABORDAGEM GEOMÉTRICA, DETECTABILIDADE E IDENTIFICAÇÃO**

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

JOSÉ AUGUSTO LEÃO

FLORIANÓPOLIS, JULHO / 1990

ERROS TOPOLÓGICOS NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA :

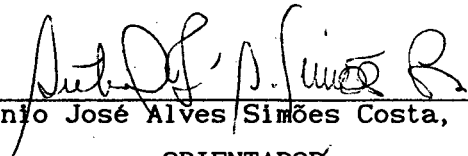
ABORDAGEM GEOMÉTRICA, DETECTABILIDADE E IDENTIFICAÇÃO

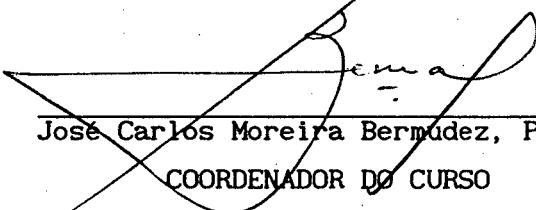
JOSÉ AUGUSTO LEÃO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

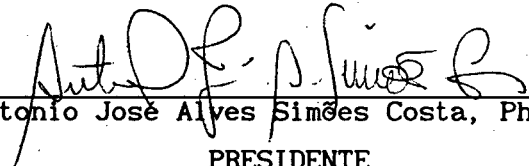
MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE EM ENGENHARIA ELÉTRICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D.
ORIENTADOR

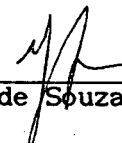

José Carlos Moreira Bermúdez, Ph.D.
COORDENADOR DO CURSO

BANCA EXAMINADORA


Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D.
PRESIDENTE


Ariovaldo Verandio Garcia, Dr. Eng. Elétrica


Roberto de Souza Salgado, Ph.D.


Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, D.Sc

Este trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES

RESUMO

A atenção do presente trabalho se concentra no tratamento de erros de topologia na estimação de estados em sistemas de potência.

Primeiramente o problema da estimação de estados em sistemas de potência é abordado com o uso de argumentos geométricos o que, além de propiciar a abordagem do assunto segundo uma nova ótica, permite também a interpretação geométrica dos efeitos dos erros grosseiros em medidas.

Em seguida é feito um estudo sobre os erros de topologia, com a análise dos principais tipos de erros e de como eles se manifestam no modelo matemático da estimação de estados. O problema dos erros topológicos também é, então, analisado sob o ponto de vista geométrico e seus efeitos são comparados com os efeitos dos erros em medidas.

É demonstrado neste trabalho que existe uma forte relação entre os efeitos dos erros de topologia e as estruturas dos sistemas elétrico e de medição e se torna necessário estabelecer condições sob as quais estes erros são detectáveis. Isto é feito na forma de teoremas que são enunciados relacionando detectabilidade de erros topológicos com a existência de medidas críticas no plano de medição.

Um método para a detecção e localização de erros topológicos baseado na análise de sensibilidade dos resíduos com respeito aos fluxos nas linhas de transmissão é proposto e testado em diferentes sistemas elétricos através de simulações de diversos tipos de erros. O método também permite o discernimento entre os efeitos de erros grosseiros em medidas e erros topológicos.

ABSTRACT

In this work, attention is focused on the processing of topology errors which may occur in power system state estimation problems.

As a first step, state estimation is approached through a geometric point-of-view, which allows a suitable geometric interpretation to both state estimation and bad data problems.

Next, a study of the topology errors, including the most frequent types of errors and their effects on the state estimation mathematical model, is carried out. The topology error problem is then analysed from the geometric point-of-view, which allows a comparison between the effects of these errors and those of gross analog measurements. It is shown that there exists a strong connection between the effects of topology errors and the electrical and metering systems. As a consequence, it is important to establish conditions under which a topology error is detectable. These conditions are formalized through theorems which relate topological error detectability and the existence of critical measurements in the measurement set.

A method for topological error detection and identification is then proposed. This method relies on a sensitivity analysis of the estimation residuals with respect to power flows on the network elements, and has been tested on different power systems, for various types of topological errors. The proposed method also enables one to distinguish between topological errors and gross measurements.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - Introdução

1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Revisão Bibliográfica	2
1.3 Contribuições do Trabalho	4
1.4 Organização do Trabalho	4

CAPÍTULO 2 - O Problema da Estimação de Estados em Sistemas de Potência

2.1 Introdução	6
2.2 Estimação de Estados em Sistemas de Potência Método Clássico	7
2.3 Detecção e Identificação de Erros Grosseiros nas Medidas	10
2.4 Observabilidade, Medidas e Conjuntos Críticos	12

CAPÍTULO 3 - Interpretação Geométrica da Estimação de Estados Via Mínimos Quadrados

3.1 Introdução	14
3.2 O Problema dos Mínimos Quadrados	14
3.3 Interpretação Geométrica da EESP	16

3.4 Interpretação Geométrica de Erros Grosseiros em Medidas	18
3.5 Considerações Finais	20

CAPÍTULO 4 - Erros Topológicos

4.1 Introdução	21
4.2 Definições Preliminares	22
4.3 Efeitos dos Erros Topológicos	24
4.4 Análise dos Erros de Topologia Sob o Ponto Vista Geométrico	30
4.5 Considerações Finais	31

CAPÍTULO 5 - Detectabilidade de Erros Topológicos

5.1 Introdução	33
5.2 Teoria Básica para a Detectabilidade de Erros Topológicos	33
5.3 Condições para a Detectabilidade de Erros Topológicos	35
5.4 Considerações Finais	38

CAPÍTULO 6 - Método para a Detecção e Identificação de Erros Topológicos

6.1 Introdução	40
6.2 Teoria Básica	41
6.3 Método Proposto	44

6.4 Algumas Considerações sobre o método	
Proposto	48
6.5 Considerações Finais	50

CAPÍTULO 7 - Simulações e Resultados

7.1 Introdução	51
7.2 Estratégias de Simulação Utilizadas.....	51
7.3 Resultados	55
7.3.1 Erros Topologicos de Exclusão Simples	
Sistema IEEE de 14 Barras	
com 45 Medidas	55
7.3.2 Erros Topologicos de Exclusão Simples	
Sistema IEEE de 14 Barras	
com 86 Medidas	63
7.3.3 Erros Topologicos de Exclusão Simples	
Sistema IEEE de 14 Barras	
com 122 Medidas	67
7.3.4 Erros Topologicos de Exclusão Simples	
Sistema IEEE de 30 Barras	
com 92 Medidas	71
7.3.5 Erros Topologicos de Exclusão Simples	
Sistema IEEE de 30 Barras	
com 143 Medidas	77
7.3.6 Erros Topologicos de Inclusão Simples	
Sistema IEEE de 14 Barras	
com 122 Medidas	82

7.3.7 Erros Topológicos de Exclusão	
Múltiplos	85
7.3.8 Erros Topológicos de Exclusão	
Múltiplos - "Bus Split".....	88
7.4 Considerações Finais	93
CAPÍTULO 8 - Conclusões e Sugestões para Trabalhos	
Futuros	
8.1 Conclusões	94
8.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
APÊNDICE I - Redução do Problema da EESP à Forma	
Não-Ponderada	102
APÊNDICE II - A matriz de Incidência das Medidas	
nos Elementos da Rede	104
APÊNDICE III - Condições de Operação do Sistema	
IEEE de 30 Barras	109

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A expansão dos sistemas de potência e a sua crescente complexidade vêm obrigando os profissionais do setor elétrico a buscarem técnicas que permitam uma operação mais segura e eficiente.

Neste contexto se insere a Estimação de Estados em Sistemas de Potência (EESP), como uma ferramenta que procura estabelecer uma base de dados a mais confiável possível e que sirva de ponto de partida para diversas decisões a nível de operação em tempo real, monitoração e análise de segurança, despacho econômico e outras funções a serem exercidas na operação de um sistema de potência em tempo real.

Entretanto, existem vários fatores que podem comprometer o bom desempenho de um estimador de estados. Entre eles pode-se citar as incertezas nos parâmetros da rede, erros grosseiros nas medidas e erros na configuração da estrutura da rede devidos a informações incorretas de "status" de chaves e disjuntores.

Diversos trabalhos já foram publicados tratando do problema de erros em medidas e propondo alternativas para solucioná-lo. Todavia, no que se refere a erros de topologia, há poucas publicações e ainda existem lacunas a serem preenchidas sem que se possa afirmar que soluções satisfatórias foram alcançadas para o problema.

No presente trabalho, pretende-se analisar o problema de erros

de topologia e verificar os meios pelos quais estes erros se manifestam no modelo da estimação de estados. Para facilitar esta análise o problema é tratado sob um enfoque geométrico.

Além disso, são estabelecidas condições para a detectabilidade destes erros e é proposto um método para o processamento de erros de topologia que se fundamenta em uma relação de sensibilidade entre os resíduos da estimação e os fluxos de potência nos elementos mal configurados.

1.2 Revisão Bibliográfica

O primeiro trabalho voltado especificamente para o problema dos erros de topologia, de autoria de Lugtu e outros [10], propõe o aproveitamento dos resultados da estimação de estados e das medidas identificadas como portadoras de erros grosseiros. Este método consiste basicamente em trocar os "status" das linhas de transmissão, transformadores ou elementos "shunt" que estiverem conectados às barras cujas medidas de injeção foram declaradas errôneas.

Posteriormente, Bonanomi e Gramberg [3] propuseram um método para a validação de dados, baseado em busca sequencial no grafo da rede, que contempla a identificação de erros topológicos. O método se baseia na realização de testes de consistência que utilizam as leis de Kirchhoff para confirmar os resultados obtidos no cálculo dos estados pela busca em grafo. Estes testes são possíveis devido à informação extra contida nas medidas redundantes.

A abordagem geométrica foi inicialmente explorada por Clements e Davis na referência [5], onde é proposto o uso de testes de colinearidade de vetores para a identificação de erros grosseiros em

medidas. Na referência [4] estes autores estenderam a abordagem geométrica ao tratamento de erros de topologia.

Um estudo dos erros topológicos e condições para a sua detectabilidade foram apresentados por Wu e Liu [22]. Neste artigo estão enunciados teoremas que se utilizam dos conceitos de observabilidade citados por Monticelli e Wu [11].

Um algoritmo para a detecção e identificação de erros topológicos baseado nas colocações feitas por Lugtu e outros [10] foi proposto por Freire na referência [6].

Finalmente, em recente publicação, Singh e Glavitsch [19], propõem uma técnica que dispensa uma solução analítica do problema mas que, com o uso de sistemas especialistas, observa as condições antes e após as operações de chaveamento, acumulando informações que fornecem subsídios para a tomada de decisões.

O uso de ferramentas poderosas como a inteligência artificial, como é proposto em [19], para solucionar o problema de erros de topologia na estimação de estados, pode ser encarado como uma pré-filtragem a ser realizada antes de execução da estimação de estados.

Os teoremas enunciados por Wu e Liu [22] que estabelecem a detectabilidade dos erros de topologia apresentam apenas a condição suficiente. Se faz necessário, portanto, a apresentação de condições mais abrangentes para a detectabilidade dos erros de topologia.

Além disso, o problema da identificação dos erros topológicos não está satisfatoriamente solucionado já que nenhum dos poucos métodos propostos obtiveram êxito na localização dos elementos mal configurados na rede elétrica.

1.3 Contribuições do Trabalho

As principais contribuições contidas neste trabalho são:

- A análise da estimação de estados via mínimos quadrados sob o ponto de vista geométrico, que leva a uma melhor compreensão do problema da estimação de estados e que permite traçar um paralelo entre os efeitos de erros grosseiros em medidas e de erros de topologia;
- A apresentação da estreita relação que existe entre a detectabilidade de erros topológicos e as medidas críticas do sistema de medição;
- A elaboração, implementação e teste de um método para a detecção de erros, discernimento entre erros em medidas e erros de topologia e localização de erros de topologia, que utiliza a relação de sensibilidade sugerida nas referências [22] e [4].

1.4 Organização do Trabalho

Esta seção apresenta de forma resumida o conteúdo de cada capítulo deste trabalho, de modo a permitir uma visão global do que é exposto.

Uma revisão do método clássico utilizado para a EESP e de métodos para a detecção e identificação de erros grosseiros em medidas é feita no Capítulo 2.

O Capítulo 3 envolve a interpretação da estimação de estados sob o ponto de vista geométrico, o que permite uma melhor compreensão da estimação e dos efeitos dos erros grosseiros em medidas.

O Capítulo 4 introduz o problema de erros de topologia. Neste

capítulo estes erros são estudados e então são verificados os seus efeitos sobre o modelo matemático da EESP. Ainda neste capítulo é feita uma análise dos erros topológicos via abordagem geométrica, que permite traçar um paralelo entre os erros grosseiros em medidas e erros de topologia.

As condições que determinam a detectabilidade dos erros topológicos são estabelecidas no Capítulo 5. No Capítulo 6 é proposta uma metodologia para o processamento de erros de topologia baseada na relação de sensibilidade apresentada nas referências [22] e [4]. As estratégias de simulação e os resultados obtidos dos testes realizados utilizando-se o método proposto no Capítulo 6 são apresentados no Capítulo 7.

O Capítulo 8 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

O PROBLEMA DA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

2.1 Introdução

Este capítulo tem o objetivo de fazer um resumo dos principais conceitos relacionados à estimação de estados de modo a propiciar uma boa compreensão dos capítulos seguintes.

O estado estático de uma rede elétrica de potência de N barras é descrito por um vetor \underline{x} que contém os módulos das tensões das N barras e $N-1$ ângulos de fase. Uma das barras é tomada como referência e o vetor \underline{x} possui a dimensão $n=2N-1$. Através deste vetor de estados tem-se a completa informação a respeito da condição de operação do sistema.

Um estimador de estados consiste em um conjunto de procedimentos computacionais que converte dados telemedidos em uma estimativa segura do estado do sistema, $\hat{\underline{x}}$.

O diagrama de blocos da figura 2.1.1 ilustra o modelo de medição descrito matematicamente por:

$$\underline{z} = \underline{h}(\underline{x}) + \underline{\eta} \quad (2.1.1)$$

onde \underline{z} é o vetor que contém os valores das m medidas ($m \times 1$); $\underline{h}(\underline{x})$ é o vetor de funções não-lineares que relaciona os n estados às m medidas ($m \times 1$); \underline{x} é o vetor de estados ($n \times 1$) e $\underline{\eta}$ é o vetor que contém os erros nas medidas ($m \times 1$).

Os elementos do vetor de erros, $\underline{\eta}$, são modelados como variáveis aleatórias de distribuição normal e média zero, e têm a sua

origem nos processos de medição e comunicação das grandezas medidas.

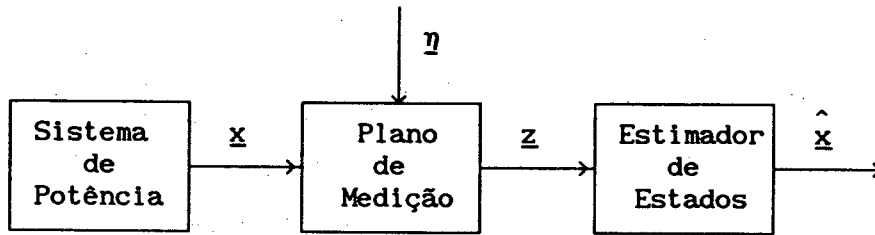


FIGURA 2.1.1

Diagrama de blocos que representa o modelo de medição usado na EESP.

O conjunto de programas que executa a estimação de estados deve também ser capaz de detectar, identificar e processar medidas que sejam portadoras de erros grosseiros.

Estas funções são de extrema importância para que a EESP alcance os seus objetivos e, assim como a estimação de estados, estão sujeitas a condições que têm uma estreita correlação com a distribuição e tipo dos medidores sobre o sistema.

As citadas condições são a observabilidade do sistema e a existência de medidas e conjuntos críticos do plano de medição.

2.2 Estimação de Estados em Sistemas de Potência - Método Clássico

Na metodologia clássica para a estimação de estados em sistemas de potência, o estado estimado, \hat{x} , é calculado como a solução de um problema de mínimos quadrados ponderados [13][14].

O vetor \hat{x} é definido como o valor de x que minimiza $J(x)$ definido abaixo [14]:

$$J(\underline{x}) = [\underline{z} - \underline{h}(\underline{x})]^T R^{-1} [\underline{z} - \underline{h}(\underline{x})] \quad (2.2.1)$$

onde R é a matriz de covariância dos erros de medição, dada por:

$$R = E \{ \underline{\eta} \underline{\eta}^T \} \quad , \quad (2.2.2)$$

e o operador $E \{ . \}$ representa o valor esperado.

Para se obter a solução da equação 2.2.1 é feita a linearização do vetor $\underline{h}(\underline{x})$ através da sua expansão em Série de Taylor em torno do ponto inicial \underline{x}^0 ,

$$\underline{h}(\underline{x}) = \underline{h}(\underline{x}^0) + H(\underline{x}^0) \Delta \underline{x} \quad (2.2.3)$$

onde $H(\underline{x}^0)$ é a matriz Jacobiana definida por:

$$H(\underline{x}^0) = \left. \frac{\partial \underline{h}(\underline{x})}{\partial \underline{x}} \right|_{\underline{x} = \underline{x}^0} \quad (2.2.4)$$

e

$$\Delta \underline{x} = \underline{x} - \underline{x}^0 \quad (2.2.5)$$

Substituindo-se a equação 2.2.3 em 2.2.1 obtém-se

$$J(\Delta \underline{x}) = [\Delta \underline{z} - H(\underline{x}^0) \Delta \underline{x}]^T R^{-1} [\Delta \underline{z} - H(\underline{x}^0) \Delta \underline{x}] \quad (2.2.6)$$

onde

$$\Delta \underline{z} = \underline{z} - \underline{h}(\underline{x}^0) \quad (2.2.7)$$

O vetor $\hat{\Delta \underline{x}}$ que minimiza a função-custo em 2.2.6 é dado por:

$$\hat{\Delta \underline{x}} = [H^T(\underline{x}^0) R^{-1} H(\underline{x}^0)]^{-1} H^T(\underline{x}^0) R^{-1} \Delta \underline{z} \quad (2.2.8)$$

ou

$$\hat{\underline{x}} = \underline{x}^0 + [H^T(\underline{x}^0) R^{-1} H(\underline{x}^0)]^{-1} H^T(\underline{x}^0) R^{-1} \Delta \underline{z} \quad (2.2.9)$$

Se o ponto inicial \underline{x}^0 estiver suficientemente próximo da solução, então a equação 2.2.9 fornece o valor desejado. Entretanto isto nem sempre ocorre, o que leva à necessidade de se obter minimizações sucessivas de 2.2.6. Isto define uma sequência de soluções \underline{x}^k , $k=1, \dots$, dada por:

$$\underline{x}^{k+1} = \underline{x}^k + [H^T(\underline{x}^k) R^{-1} H(\underline{x}^k)]^{-1} H^T(\underline{x}^k) R^{-1} \Delta \underline{z} \quad (2.2.10)$$

As iterações prosseguem até que algum critério pré-determinado declare que $J(\underline{x}^k)$ está próximo do mínimo. Então considera-se que

$$\hat{\underline{x}} = \underline{x}^k \quad (2.2.11)$$

Algumas simplificações podem ser feitas sobre o modelo matemático apresentado pela equação 2.2.1, resultando em um modelo linear aproximado [15]. Este modelo linear, descrito pela equação 2.2.12, é obtido considerando-se o desacoplamento de potência ativa / ângulo das tensões com potência reativa / módulo das tensões. Além disso, assumindo-se que o módulo da tensão em todas as barras é igual a 1, o vetor de medidas, \underline{z} , é restrito às medidas de potência ativa e o vetor de estados, \underline{x} , aos ângulos das tensões [4]. Este modelo também é denominado "modelo DC".

$$\underline{z} = H \underline{x} + \eta \quad (2.2.12)$$

Estas aproximações fazem com que a função a ser minimizada seja

$$J(\underline{x}) = (\underline{z} - H \underline{x})^T R^{-1} (\underline{z} - H \underline{x}) \quad (2.2.13)$$

e a solução, $\hat{\underline{x}}$, seja obtida em apenas uma iteração por:

$$\hat{\underline{x}} = (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} \underline{z} \quad (2.2.14)$$

O vetor de resíduos da estimação, \underline{r} , é definido como

$$\underline{r} = \underline{z} - h(\underline{x}) \quad (2.2.15)$$

e a matriz de covariância dos resíduos é dada por [4]:

$$C = R - H (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T \quad (2.2.16)$$

O vetor de resíduos normalizados, \underline{r}^N , é definido por:

$$\underline{r}^N = [\text{diag}(C)]^{-1/2} \underline{r} \quad (2.2.17)$$

É possível se estabelecer uma relação de sensibilidade entre o vetor de resíduos, \underline{r} , e o vetor de erros nas medidas, η . Esta relação envolve a chamada matriz de sensibilidade dos resíduos em relação aos erros de medição, W , e é dada por [4]:

$$\underline{r} = W \eta \quad (2.2.18)$$

onde
$$W = C R^{-1} \quad (2.2.19)$$

isto é,
$$W = I - H (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} \quad (2.2.20)$$

2.3 Deteccão e Identificação de Erros Grosseiros nas Medidas

A deteção de erros grosseiros é normalmente feita através de um método que se utiliza de testes de hipóteses. Neste método o valor de $J(\hat{\underline{x}})$ é comparado com um limiar ξ de modo que [2]:

Se $J(\hat{\underline{x}}) \leq \xi$, aceita-se a hipótese H_0 ;

Se $J(\hat{\underline{x}}) > \xi$, aceita-se a hipótese H_1 ,

onde $H_0 \Rightarrow$ não existem erros grosseiros;

$H_1 \Rightarrow$ existem erros grosseiros.

O limiar ξ é o valor da distribuição da função qui-quadrado, χ^2 , com $(m-n)$ graus de liberdade e probabilidade de falso alarme α . Este método é denominado Teste- $J(\underline{x})$.

Por outro lado, a identificação de erros grosseiros pode ser feita através de diferentes métodos, cada um com as suas peculiaridades.

Uma das possíveis maneiras de se identificar a medida portadora de erros é considerar errônea a medida que possuir o resíduo normalizado de maior magnitude.

Alternativamente, o método apresentado por Mili e outros [24] e Amaral e Simões Costa [1] [2] se aplica à identificação de erros grosseiros múltiplos utilizando testes de hipóteses. Primeiramente é formada uma relação de medidas suspeitas, S_0 , composta pelas medidas cujas magnitudes dos resíduos normalizados excedem um valor pré-determinado (adotado como igual a 3 nas referências [1] e [2]). Esta lista S_0 sofre um refinamento preliminar que consiste em remover sucessivamente cada componente de S_0 , recalcular os resíduos normalizados e realizar um novo teste sobre estes resíduos.

Após a remoção de todas as medidas em S_0 , é feito um novo teste sobre $J(\hat{\underline{x}})$ de modo a garantir que todas as medidas portadoras de erros

estão em S_0 .

Finalmente é feita a identificação das medidas que contêm erros grosseiros efetuando-se testes de hipóteses sobre valores estimados dos erros nas medidas pertencentes a S_0 .

Garcia e Monticelli apresentam na referência [7] uma outra metodologia para a detecção e identificação de erros grosseiros denominado Teste- \hat{b} . De acordo com os autores, este método é mais eficiente para a detecção que o Teste- $J(\underline{x})$, que não tem um bom desempenho para erros de magnitude na faixa de 3 a 20 desvios padrões.

Este método consiste na avaliação do parâmetro \hat{b}_i dado por:

$$\hat{b}_i = \frac{|z_i - \tilde{z}_i|}{\sigma_i} \quad (2.3.1)$$

onde: z_i = valor da medida i ;

\tilde{z}_i = valor estimado para a medida i ignorando-se a existência da própria medida i ;

σ_i = desvio padrão da medida i .

O parâmetro \hat{b}_i é calculado para a medida que possuir maior resíduo normalizado em valor absoluto. Se \hat{b}_i for maior que um certo limiar então a medida i é considerada portadora de erro grosseiro.

O Teste- \hat{b} também pode ser utilizado para a identificação de erros múltiplos através do método de identificação por eliminação - IPE, como consta em [2]. Neste método as medidas consideradas errôneas pelo Teste- \hat{b} são sucessivamente eliminadas até que todos os erros grosseiros sejam removidos.

Uma outra técnica utilizada é o chamado Teste- \underline{r}^N , que detecta e identifica os erros grosseiros simultaneamente realizando testes sobre os resíduos normalizados [8]. Se

$$\max |r_i| \geq \gamma \quad , \quad (2.3.2)$$

onde γ é o limiar de detecção adotado, então a medida i é declarada como portadora de erros.

2.4 Observabilidade, Medidas e Conjuntos Críticos

As definições feitas nesta seção estão de acordo com as referências [7] e [12].

Um sistema de potência é dito *observável*, com respeito ao plano de medição que lhe é imposto, se o vetor de estados do sistema pode ser determinado por um estimador de estados. A condição necessária para que seja possível a execução da estimação de estados é, portanto, que o sistema seja observável.

Uma medida é *crítica* se, ao ser retirada do plano de medição, provoca a perda da observabilidade da rede. As medidas críticas possuem as seguintes propriedades :

- O resíduo de uma medida crítica é igual a zero. Logo um erro grosseiro em uma medida crítica não é detectável [18];
- As colunas da matriz de sensibilidade, W , relativas às medidas críticas são nulas [5].

Um *conjunto crítico* é um subconjunto de medidas tal que a remoção de qualquer uma delas torna simultaneamente críticas as medidas restantes [18]. As propriedades das medidas pertencentes aos conjuntos críticos são:

- Os resíduos de todas as medidas pertencentes a um conjunto crítico são iguais [18]. Isto faz com que um erro grosseiro em uma destas medidas seja impossível de se identificar.
- As colunas da matriz W correspondentes às medidas pertencentes a um mesmo conjunto crítico são linearmente dependentes

[5].

É importante ressaltar que os conceitos de observabilidade e medidas e conjuntos críticos estão associados à quantidade, localização e tipo das medidas, ou seja, são conceitos relacionados às estruturas dos sistemas elétrico e de medição [12].

CAPÍTULO 3

INTERPRETAÇÃO GEOMÉTRICA DA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS VIA MÍNIMOS QUADRADOS

3.1 Introdução

A interpretação da estimação de estados sob o ponto de vista geométrico permite uma melhor compreensão de como a solução é obtida e de como esta solução pode ser afetada por erros grosseiros em medidas.

Esta abordagem geométrica é feita, primeiramente, através de um estudo puramente matemático do problema de mínimos quadrados, utilizando-se os conceitos de projeções ortogonais. Em seguida estes conceitos são estendidos para o modelo linearizado da EESP.

3.2 O Problema dos Mínimos Quadrados

O problema dos mínimos quadrados é definido por Stewart na referência [20] como sendo o problema de se determinar o vetor \underline{x} que minimiza a função

$$\rho^2(\underline{x}) = \|\underline{b} - A \underline{x}\|_2^2, \quad (3.2.1)$$

onde A é uma matriz fixa de dimensão $m \times n$ e \underline{b} é um vetor fixo de dimensão $n \times 1$. O operador $\|\cdot\|_2$ representa a norma Euclidiana. O escalar ρ^2 é chamado de soma dos quadrados dos resíduos.

Quando a matriz A possui todas as suas colunas linearmente independentes, ou seja, quando o posto de A for igual a n , a solução do problema apresentado por 3.2.1 é, segundo a referência [20], dada por:

$$\underline{x} = A^+ \underline{b} \quad (3.2.2)$$

onde

$$A^+ = (A^T A)^{-1} A^T. \quad (3.2.3)$$

A matriz A^+ é chamada matriz pseudo-inversa da matriz A .

Por outro lado, o operador *projeção ortogonal sobre o espaço gerado pelas colunas de A , $\text{Im}(A)$* , representado pela matriz P_A , é definido como [21]

$$P_A = A A^+ \quad (3.2.4)$$

Portanto, para um dado vetor \underline{y} , o produto $P_A \underline{y}$ fornece a projeção de \underline{y} sobre o espaço $\text{Im}(A)$. A figura 3.2.1 ilustra esta afirmação, tendo em conta que a dimensão do espaço $\text{Im}(A)$ é igual a 2.

A matriz Q_A dada por:

$$Q_A = I - P_A \quad (3.2.5)$$

ou

$$Q_A = I - A (A^T A)^{-1} A^T \quad (3.2.6)$$

representa o operador *projeção ortogonal sobre o complemento ortogonal do espaço $\text{Im}(A)$, denotado por $\text{Im}(A)^\perp$* [23].

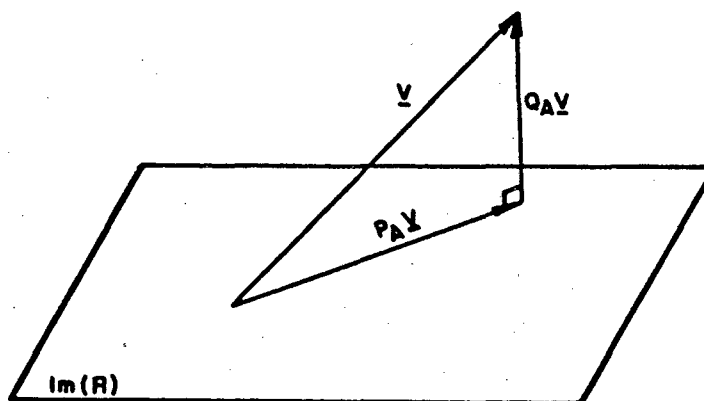


FIGURA 3.2.1

Projeção do vetor genérico \underline{y} sobre o espaço $\text{Im}(A)$ e sobre o seu complemento ortogonal, $\text{Im}(A)^\perp$.

Voltando à figura 3.2.1 observa-se que o produto $Q_A \underline{y}$ fornece a projeção ortogonal do vetor \underline{y} sobre o espaço $\text{Im}(A)^\perp$ e que, partindo-se

de 3.2.5, a seguinte relação é válida:

$$Q_A \underline{v} = \underline{v} - P_A \underline{v} \quad (3.2.7)$$

isto é,

$$\underline{v} = P_A \underline{v} + Q_A \underline{v} \quad (3.2.8)$$

3.3 Interpretação Geométrica da EESP

A equação 2.2.13 descreve o problema de mínimos quadrados ponderados correspondente ao modelo linearizado da estimação de estados (modelo DC). Através de uma simples mudança de variáveis, apresentada no Apêndice I, é possível re-escrever o problema em uma forma não-ponderada. Isto é, o problema original é transformado em outro problema de mínimos quadrados no qual a matriz de ponderação é igual à identidade. Entretanto, por conveniência, a notação adotada no Capítulo 2 será mantida na sequência deste capítulo, com a consideração de que

$$R = I \quad (3.3.1)$$

Neste caso o problema se torna

$$J(\underline{x}) = (\underline{z} - H \underline{x})^T (\underline{z} - H \underline{x}), \quad (3.3.2)$$

o que é equivalente a escrever

$$J(\underline{x}) = \|\underline{z} - H \underline{x}\|_2^2 \quad (3.3.3)$$

A equação 3.3.3 possui a mesma forma de 3.2.1; portanto, a solução de 3.3.3 é fornecida por

$$\hat{\underline{x}} = H^+ \underline{z} \quad (3.3.4)$$

onde H^+ é a matriz pseudo-inversa de H e

$$H^+ = (H^T H)^{-1} H^T \quad (3.3.5)$$

Do mesmo modo, usando a equação 3.2.4, conclui-se que:

$$P_H = H H^+ \quad (3.3.6)$$

representa o operador projeção ortogonal sobre o espaço $\text{Im}(H)$ e,

pela equação 3.2.5, a matriz

$$Q_H = I - P_H \quad (3.3.7)$$

ou

$$Q_H = I - H (H^T H)^{-1} H^T \quad (3.3.8)$$

corresponde ao operador projeção ortogonal sobre o complemento ortogonal de $\text{Im}(H)$, $\text{Im}(H)^\perp$.

O vetor \hat{z} que contém os valores estimados para as medidas é obtido por:

$$\hat{z} = H \hat{x} \quad (3.3.9)$$

Substituindo-se a equação 3.3.4 em 3.3.9 tem-se

$$\hat{z} = H H^+ z = P_H z \quad (3.3.11)$$

Isto é, \hat{z} é a projeção ortogonal de z sobre o espaço $\text{Im}(H)$. Em outras palavras :

A solução da EESP pelo método dos mínimos quadrados é o vetor \hat{x} tal que o vetor \hat{z} , dado por 3.3.9, corresponda à projeção ortogonal de z sobre $\text{Im}(H)$.

Se, na equação 2.2.20, que fornece a matriz de sensibilidade dos resíduos, for também suposto que $R = I$, obtém-se o lado direito da equação 3.3.8, ou seja

$$W = Q_H \quad (3.3.12)$$

o que permite concluir que a matriz de sensibilidade dos resíduos em relação aos erros de medição, W , é o operador projeção ortogonal sobre o espaço $\text{Im}(H)^\perp$. Logo, a relação de sensibilidade dada por 2.2.18 pode agora ser traduzida no fato que o vetor de resíduos, r , pertence ao espaço $\text{Im}(H)^\perp$. Isto é:

O vetor de resíduos \underline{r} é a projeção ortogonal do vetor de medidas \underline{z} sobre o complemento ortogonal do espaço coluna da matriz Jacobiana H , $\text{Im}(H)^\perp$, sendo portanto ortogonal a qualquer vetor pertencente a $\text{Im}(H)$. Desta forma \underline{r} é ortogonal ao vetor de estimativas para as medidas, $\hat{\underline{z}}$.

Uma situação interessante de se analisar ocorre quando o número de medidas é igual ao número de estados. Neste caso, como não existe redundância de medidas, todas as medidas são críticas e a matriz de sensibilidade W é nula.

Portanto, pela equação 3.3.7, o operador projeção ortogonal P_H é, para esta situação, igual à matriz identidade, ou seja,

$$P_H = I \quad , \quad (3.3.13)$$

e, segundo a equação 3.3.11, as estimativas para as medidas serão iguais às próprias medidas, isto é,

$$\hat{\underline{z}} = \underline{z} \quad . \quad (3.3.14)$$

As afirmações acima comprovam o forte vínculo existente entre a redundância de medidas e o bom desempenho da estimação de estados através de argumentos geométricos.

3.4 Interpretação Geométrica de Erros Grosseiros em Medidas

A introdução dos conceitos de projeções ortogonais sobre o espaço coluna de H e sobre o seu complemento ortogonal, assim como suas conexões com o problema de mínimos quadrados, permite também que a abordagem da seção anterior possa ser estendida de modo a permitir uma interpretação geométrica do problema de erros grosseiros em medidas. No

capítulo seguinte será visto que os erros de topologia também podem ser interpretados geometricamente.

A presença de erros grosseiros nas medidas pode ser interpretada como uma perturbação sobre o vetor de medidas, alterando-o e, conseqüentemente, modificando o seu posicionamento em relação ao espaço $\text{Im}(H)$. O vetor de resíduos, resultante da projeção do vetor de medidas que contém erros sobre o complemento ortogonal do espaço coluna da matriz Jacobiana, também é afetado e, conseqüentemente, o seu módulo será maior do que seria se os erros grosseiros não estivessem presentes.

Estas colocações são melhor compreendidas quando se analisa o caso de duas variáveis de estado e três medidas, ilustrado pela figura 3.3.1. Supondo-se que o vetor de medidas \underline{z}' possua erros grosseiros, a solução da EESP fornece os vetores \underline{r}' e $\hat{\underline{z}}'$. Por outro lado, quando não existem erros grosseiros o vetor de medidas é representado por \underline{z} e a solução resulta em \underline{r} e $\hat{\underline{z}}$.

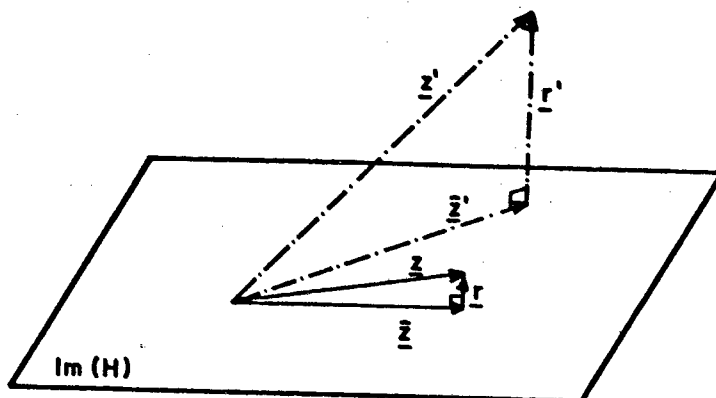


FIGURA 3.4.1

Vetores de medidas com erros grosseiros, \underline{z}' , e sem erros grosseiros, \underline{z} , projetados sobre o espaço $\text{Im}(H)$.

3.5 Considerações Finais

Neste capítulo foi visto que, quando se usa argumentos geométricos, mais precisamente os conceitos de projeções ortogonais, para interpretar o modelo matemático da EESP pelo método dos mínimos quadrados, a solução do problema se reduz à obtenção de uma "melhor aproximação" do vetor de medidas sobre o espaço coluna da matriz Jacobiana [23].

Além disso, é possível aplicar estes conceitos quando existem erros grosseiros nas medidas. Esta situação implica no crescimento do módulo do vetor de resíduos da estimação, o que justifica o uso dos resíduos para a detecção de erros em medidas.

CAPÍTULO 4

ERROS TOPOLÓGICOS

4.1 Introdução

Os erros topológicos são falhas decorrentes da configuração errônea de um ou mais elementos da rede. Por elementos da rede entendem-se linhas de transmissão, transformadores, capacitores e indutores em conexão transversal (elementos "shunt"). A má configuração destes elementos decorre do recebimento, por parte do sistema configurador de redes, de informações erradas de "status" de chaves e disjuntores, gerando inconsistências entre o sistema em operação e aquele configurado.

O estado do sistema fornecido pelo estimador de estados pode ser sensivelmente comprometido por tais situações. É necessário, portanto, que o problema de erros de topologia seja analisado de modo a fornecer subsídios para uma metodologia que possa levar à detecção destes erros e à sua correta identificação.

Como uma abordagem inicial, o presente capítulo tem por objetivo estudar como os erros de topologia podem surgir na operação em tempo real de sistemas de potência e quais os seus possíveis efeitos sobre a EESP.

4.2 Definições Preliminares

Os erros topológicos podem ser simples, no caso de apenas um elemento mal configurado, ou múltiplos, se mais de um elemento da rede constituírem erros de configuração.

Os erros topológicos simples podem ser de dois tipos, a saber:

- Erro Topológico de Exclusão:

O erro de exclusão ocorre quando um elemento do sistema de potência está em operação mas não é configurado na rede.

- Erro Topológico de Inclusão:

Este tipo de erro é a situação oposta ao caso anterior.

Nos erros de inclusão o elemento não está em operação mas é configurado.

Qualquer erro topológico múltiplo pode ser obtido por uma combinação dos erros de inclusão e de exclusão.

Um importante exemplo de erro topológico múltiplo é o seccionamento de barra, também chamado de "bus split" [22]. Este erro resulta na exclusão (ou inclusão) de barras conectadas (ou desconectadas) ao sistema, afetando o número total de barras e, conseqüentemente, o número de estados. A figura 4.2.1 ilustra o erro topológico do tipo seccionamento de barra ("bus split").

No exemplo mostrado pela figura 4.2.1 a barra 5 do sistema é desdobrada em duas devido à exclusão dos elementos 2-5 e 4-5 e à inclusão dos elementos 2-6 e 4-6.

Diz-se que uma medida é *relacionada* a um determinado elemento da rede se esta medida for uma medida de injeção de potência em uma das barras terminais do elemento ou se for uma medida de fluxo de potência sobre o elemento em questão. Recíprocamente, diz-se que o elemento está

relacionado a estas medidas.

Diz-se que um elemento é *irrelevante* quando o elemento não estiver relacionado a nenhuma medida [22].

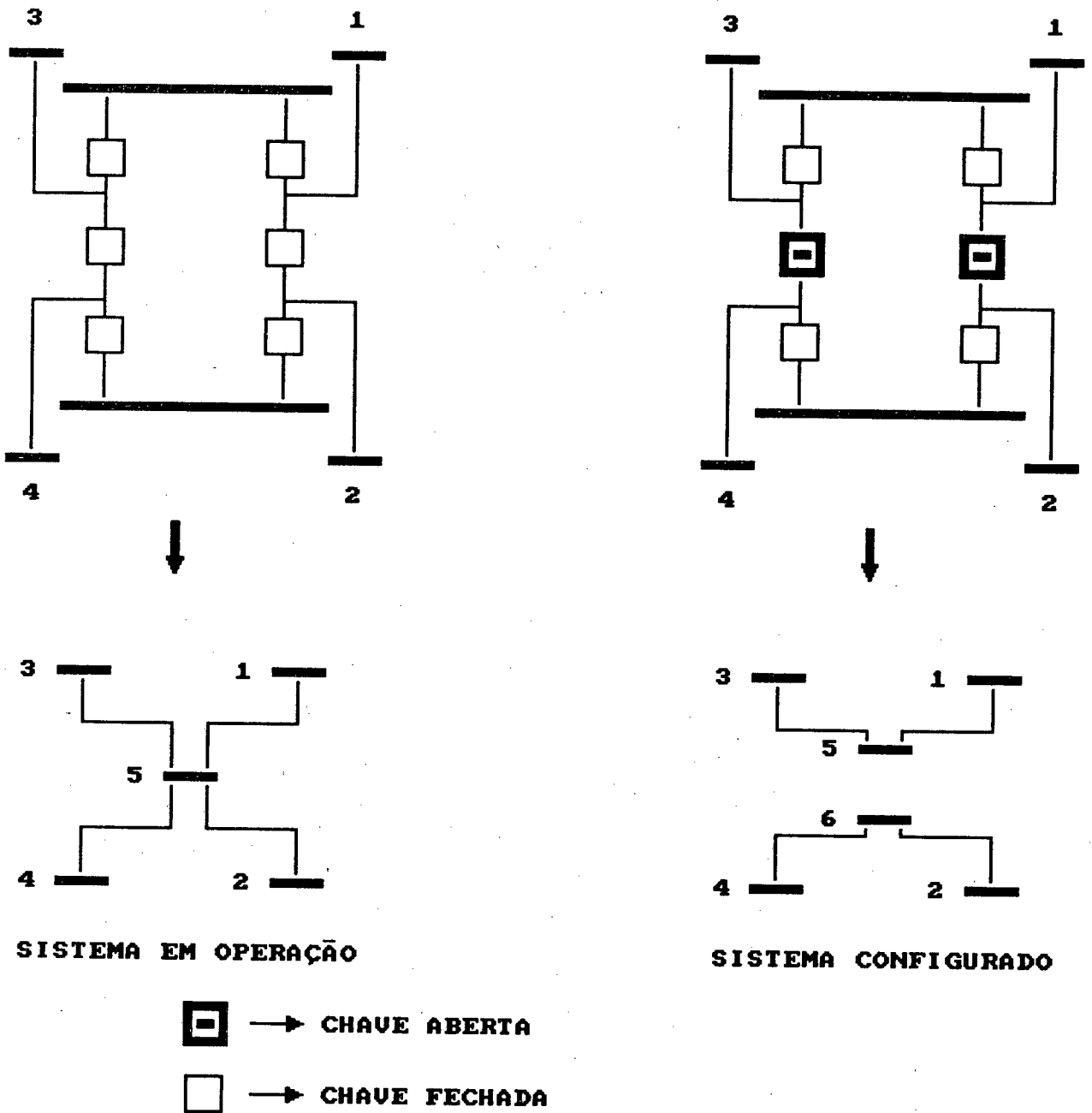


FIGURA 4.2.1

Exemplo de erro topológico múltiplo do tipo seccionamento de barra

4.3 Efeitos dos Erros Topológicos

A informação a respeito da topologia da rede elétrica está inserida na equação do modelo de medição

$$\underline{z} = \underline{h}(\underline{x}) + \underline{\eta} \quad (4.3.1)$$

através do vetor de funções não-lineares $\underline{h}(\underline{x})$. Logo, os efeitos dos erros de topologia se manifestarão no modelo por meio deste vetor. A maneira como a topologia do sistema é representada no modelo matemático da estimação depende portanto do plano de medição. Isto significa dizer que quanto melhor for o plano de medição, mais completa será a representação da topologia do sistema no estimador e os erros se manifestarão com maior intensidade.

A forma como os erros de topologia se apresentam pode ser observada estudando-se o elemento genérico i-j de um sistema elétrico, como mostra a figura 4.3.1. O elemento i-j possui medidas de fluxo de potência ativa, t_{i-j} , e reativa, u_{i-j} , e de injeção de potência ativa, p_i , e reativa, q_i .

Considera-se que o vetor $\underline{h}(\underline{x})$ possui cinco partições correspondentes aos conjuntos de medidas de: tensão, \underline{v} ; fluxo de potência ativa, \underline{t} ; fluxo de potência reativa, \underline{u} ; injeção de potência ativa, \underline{p} e injeção de potência reativa, \underline{q} , como é mostrado abaixo:

$$\underline{h}(\underline{x}) = \begin{bmatrix} \underline{v}(\underline{x}) \\ \underline{t}(\underline{x}) \\ \underline{u}(\underline{x}) \\ \underline{p}(\underline{x}) \\ \underline{q}(\underline{x}) \end{bmatrix}$$

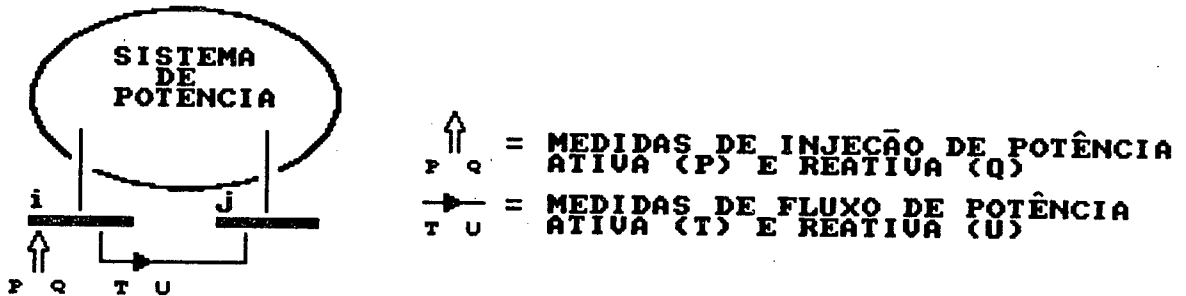


FIGURA 4.3.1

Elemento genérico de um sistema de potência relacionado a medidas de fluxo e de injeção de potência

Supondo-se que o elemento $i-j$ está excluído erroneamente, o vetor $\underline{h}(\underline{x})$ é afetado nas posições relativas às medidas de fluxo de potência $t_{i-j}(\underline{x})$ e $u_{i-j}(\underline{x})$ e de injeção de potência $p_i(\underline{x})$ e $q_i(\underline{x})$.

As medidas de fluxo de potência são eliminadas do plano de medição com a exclusão do elemento $i-j$, afetando o número de elementos em $\underline{h}(\underline{x})$.

No caso das medidas de injeção de potência, o erro está na montagem das funções $p_i(\underline{x})$ e $q_i(\underline{x})$. As funções que relacionam os estados às medidas de injeção de potência podem ser escritas em termos dos fluxos de potência, ou seja:

$$p_i(\underline{x}) = \sum_{k \in \Omega_i} t_{i-k}(\underline{x}) \quad (4.3.2)$$

e

$$q_i(\underline{x}) = \sum_{k \in \Omega_i} u_{i-k}(\underline{x}) \quad (4.3.3)$$

onde Ω_i é o conjunto de barras conectadas à barra i .

A exclusão do elemento $i-j$ implica na ausência dos termos

$t_{1-j}(\underline{x})$ e $u_{1-j}(\underline{x})$ na montagem das equações relativas a $p_1(\underline{x})$ e $q_1(\underline{x})$ respectivamente. Logo, as funções $p_1(\underline{x})$ e $q_1(\underline{x})$ montadas pelo estimador não correspondem ao sistema em operação.

O vetor $\underline{h}(\underline{x})$ correspondente ao sistema configurado pode ser decomposto em duas componentes:

$$\underline{h}(\underline{x}) = \underline{h}^R(\underline{x}) - \Delta\underline{h}(\underline{x}) \quad (4.3.4)$$

ou

$$\underline{h}^R(\underline{x}) = \underline{h}(\underline{x}) + \Delta\underline{h}(\underline{x}) \quad (4.3.5)$$

onde $\underline{h}^R(\underline{x})$ é o vetor de funções não-lineares que relacionam os estados às medidas correspondente ao sistema em operação e $\Delta\underline{h}(\underline{x})$ é o vetor que contém os erros provenientes da má configuração de elementos.

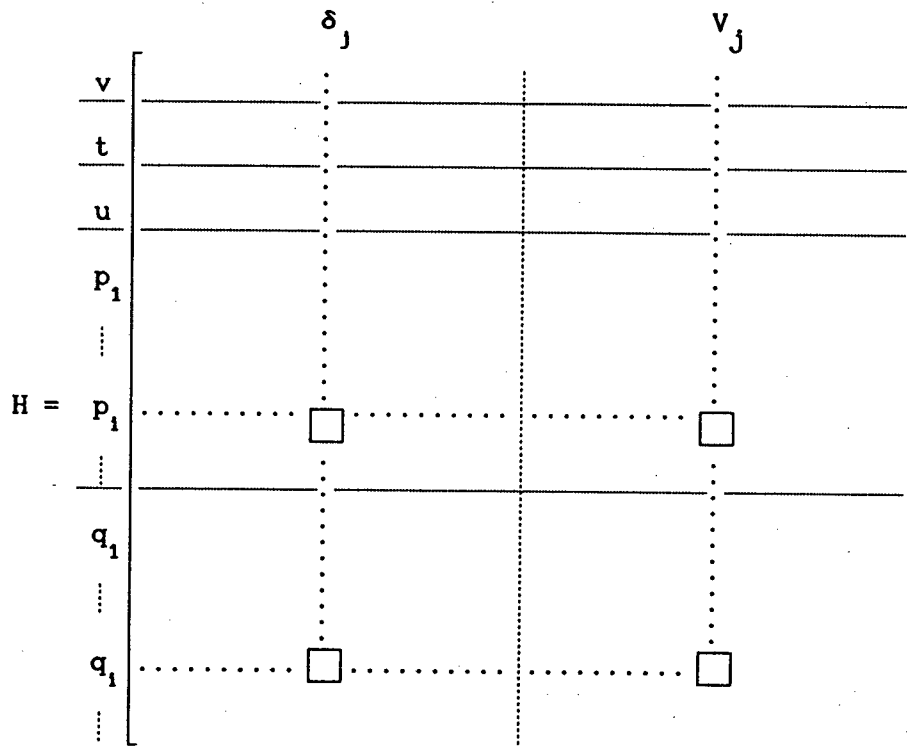
Os vetores $\underline{h}(\underline{x})$ e $\Delta\underline{h}(\underline{x})$ possuem as seguintes estruturas:

$$\underline{h}(\underline{x}) = \begin{bmatrix} \underline{v}(\underline{x}) \\ \underline{t}(\underline{x}) \\ \underline{u}(\underline{x}) \\ p_1(\underline{x}) \\ \vdots \\ p_1(\underline{x}) \\ \vdots \\ q_1(\underline{x}) \\ \vdots \\ q_1(\underline{x}) \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} \longrightarrow \\ \\ \\ \\ \\ \longrightarrow \\ \\ \end{matrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ t_{1-j}(\underline{x}) \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ u_{1-j}(\underline{x}) \\ \vdots \end{bmatrix} = \Delta\underline{h}(\underline{x})$$

Os efeitos que aparecem em $\underline{h}(\underline{x})$ se transmitem à matriz Jacobiana, H , definida pela equação 2.2.4. No exemplo da figura 4.3.1 os elementos de H correspondentes às derivadas

$$\frac{\partial p_1(\underline{x})}{\partial \delta_j}, \quad \frac{\partial p_1(\underline{x})}{\partial V_j}, \quad \frac{\partial q_1(\underline{x})}{\partial \delta_j}, \quad \frac{\partial q_1(\underline{x})}{\partial V_j}$$

serão nulos e a estrutura da matriz Jacobiana será afetada nas posições assinalados abaixo:



Um raciocínio análogo e válido para o caso de um erro de inclusão. Neste caso os elementos não-nulos de $\Delta \underline{h}(\underline{x})$ serão $-t_{1-j}(\underline{x})$ e $-u_{1-j}(\underline{x})$ e, em lugar de zeros, existirão as derivadas

$$\frac{\partial p_1(\underline{x})}{\partial \delta_j}, \quad \frac{\partial p_1(\underline{x})}{\partial V_j}, \quad \frac{\partial q_1(\underline{x})}{\partial \delta_j}, \quad \frac{\partial q_1(\underline{x})}{\partial V_j}$$

nas mesmas posições assinaladas na matriz Jacobiana acima. As medidas de de fluxo sobre o elemento incluído também são incluídas no plano de medição, afetando o vetor $\underline{h}(\underline{x})$ e a matriz H .

Uma outra situação interessante de ser examinada se dá na ocorrência de erros topológicos múltiplos em elementos conectados à uma mesma barra cuja injeção de potência é medida. Para ilustrar esta

situação utiliza-se o sistema da figura 4.3.2.

A inclusão errônea dos elementos $i-j$ e $j-t$ resulta em um vetor de erros com a seguinte estrutura:

$$\Delta \underline{h}(\underline{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ \hline 0 \\ \vdots \\ -t_{i-j}(\underline{x}) \\ \vdots \\ \hline 0 \\ \vdots \\ -u_{i-j}(\underline{x}) \\ \vdots \\ \hline 0 \\ \vdots \\ -t_{j-1}(\underline{x}) \quad -t_{j-k}(\underline{x}) \\ \vdots \\ \hline 0 \\ \vdots \\ -u_{j-1}(\underline{x}) \quad -u_{j-k}(\underline{x}) \\ \vdots \end{bmatrix}$$

As medidas $t_{i-j}(\underline{x})$ e $u_{i-j}(\underline{x})$ são incluídas quando na realidade não deveriam existir, e o erro provocado sobre as medidas de injeção de potência é igual à soma dos fluxos nos dois elementos mal configurados.

Os erros de topologia nem sempre afetam o modelo da estimação de estados. Isto pode ser verificado ao se analisar a má configuração de

um elemento irrelevante. Esta é uma situação em que o vetor de erros $\Delta \underline{h}(\underline{x})$ na equação 4.3.5 é nulo, fazendo com que

$$\underline{h}^R(\underline{x}) = \underline{h}(\underline{x}) \quad (4.3.6)$$

Portanto, neste caso, a EESP será executada sem sofrer a interferência do erro de topologia.

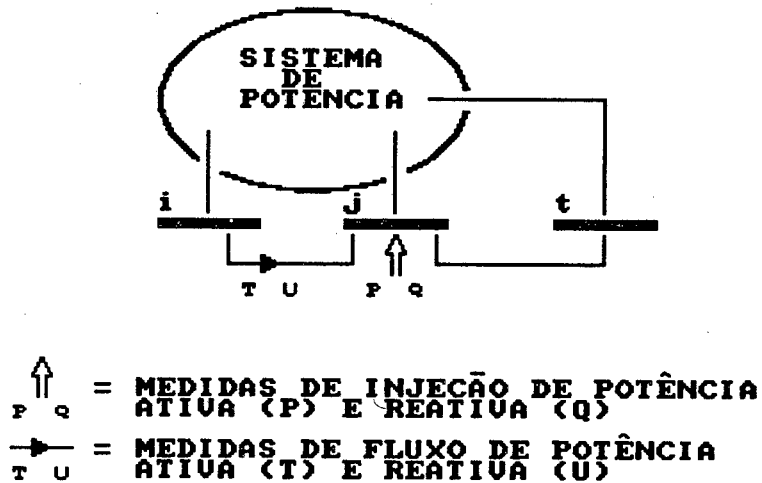


FIGURA 4.3.2

Sistema exemplo de erro topológico múltiplo de inclusão em dois elementos conectados à uma mesma barra.

A exclusão de elementos que possuem apenas medidas de fluxo de potência é equivalente à exclusão de elementos irrelevantes já que as medidas de fluxo são excluídas juntamente com o elemento.

Como os elementos irrelevantes são um caso muito particular, na sequência deste trabalho os elementos serão considerados não-irrelevantes, a não que alguma observação explícita seja feita em contrário.

4.4 Análise dos Erros de Topologia Sob o Ponto de Vista Geométrico

Esta seção tem por objetivo associar duas afirmações feitas neste trabalho, levando a algumas conclusões interessantes.

No Capítulo 3 é mostrado que a solução da estimação de estados pelo modelo linearizado (modelo DC) é obtida através da projeção do vetor de medidas, \underline{z} , sobre o espaço $\text{Im}(H)$.

A seção 4.3 deste capítulo demonstra que, quando existe algum elemento da rede mal configurado, a matriz Jacobiana, H , é afetada.

As afirmações feitas acima permitem concluir que, na presença de erros de topologia, a solução da estimação de estados é obtida pela projeção do vetor \underline{z} sobre o espaço $\text{Im}(H)$, que corresponde ao sistema elétrico configurado, e não sobre o espaço $\text{Im}(H^R)$ que corresponde ao sistema realmente em operação.

A figura 3.3.1 mostra que, quando não existem quaisquer tipos de erros, o vetor de medidas está próximo ao espaço gerado pelas colunas da matriz Jacobiana, já que as medidas contém apenas pequenos erros aleatórios e, conseqüentemente, o vetor de resíduos é pequeno.

Entretanto, em conseqüência dos erros de topologia, o espaço $\text{Im}(H)$, relativo ao sistema configurado, sofre uma perturbação que o distancia de \underline{z} e a estimação resulta em um vetor de resíduos de norma maior. Esta alteração do vetor de resíduos quando estão presentes erros de topologia é ilustrada na figura 4.4.1, onde são comparados os vetores de resíduos \underline{r}^R e \underline{r} , que correspondem aos sistemas real e configurado com erros de topologia, respectivamente.

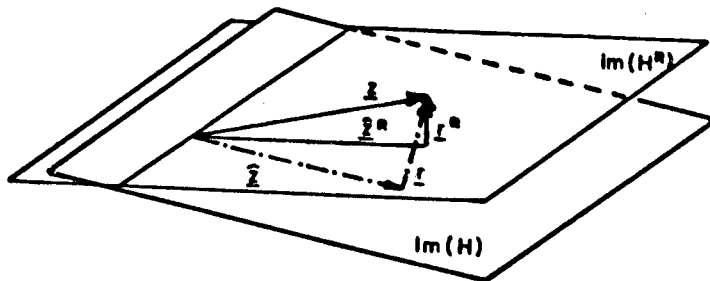


FIGURA 4.4.1

Vetor de medidas, z , projetado sobre os espaços sem erros de topologia, $Im(H^R)$, e com erros de topologia $Im(H)$.

4.5 Considerações Finais

No presente capítulo foi feito um estudo de como os erros de topologia se manifestam no modelo matemático da estimação de estados em sistema de potência. Inicialmente foram definidas como medidas relacionadas a um determinado elemento da rede aquelas medidas que, de alguma forma, estão associadas ao fluxo de potência no elemento, seja através da medição direta da potência que flui através do elemento ou pela medição da injeção de potência nas barras terminais do elemento. Além disso foi visto que elementos irrelevantes são aqueles elementos que não estão relacionados à medidas.

Também foi mostrado que os erros de topologia aparecem no modelo matemático da EESP através do vetor de funções não-lineares $h(\underline{x})$, afetando a matriz Jacobiana. Verifica-se igualmente que a má configuração de elementos irrelevantes não provoca alterações na matriz Jacobiana e não afeta a EESP.

Uma importante conclusão pode ser tirada quando se compara as seções 4.4 e 3.3.

Na seção 3.3, mais particularmente, na figura 3.3.1, é observado que os erros grosseiros afetam o vetor de medidas, ao passo que, de acordo com a figura 4.4.1, a má configuração de elementos da rede faz com que o espaço $\text{Im}(H)$ não coincida com $\text{Im}(H^R)$. Em ambas as situações o vetor de resíduos é afetado e pode ser considerado um indicador da presença tanto de erros grosseiros em medidas quanto de erros de topologia.

CAPÍTULO 5

DETECTABILIDADE DE ERROS TOPOLÓGICOS

5.1 Introdução

No capítulo anterior foi visto que a má configuração de elementos da rede e a existência de erros grosseiros nas medidas relacionadas a estes elementos se manifestam de maneira equivalente no vetor de resíduos.

É natural, então, pensar que os erros de topologia nem sempre são detectáveis, como, aliás, também ocorre com os erros grosseiros em medidas. Diante disso, se faz necessário estabelecer condições sob as quais os erros de topologia são detectáveis para qualquer estado do sistema.

Este capítulo tem por objetivo investigar as condições para as quais a detectabilidade de erros de topologia pode ser assegurada. A abordagem adotada faz uso de conceitos associados a medidas críticas, o que propicia a formulação de condições mais simples e abrangentes do que as enunciadas por Wu e Liu [22].

5.2 Teoria Básica para a Detectabilidade de Erros Topológicos

Tomando-se como base a equação 4.3.5, a matriz Jacobiana pode ser decomposta em duas componentes:

$$H^R = H + \Delta H \quad (5.2.1)$$

onde H^R é a matriz Jacobiana relativa ao sistema real, H é a matriz Jacobiana calculada e utilizada pelo estimador e ΔH é a matriz que contém os erros devidos a má configuração de elementos da rede.

A matriz ΔH corresponde à matriz Jacobiana do subsistema composto pelos elementos configurados erroneamente e pelas medidas a eles relacionadas.

Se todos os elementos da rede estivessem configurados corretamente, o modelo linear aproximado (modelo DC) que forneceria a solução da estimação de estados seria:

$$\underline{z} = H^R \underline{x} + \underline{\eta} \quad (5.2.2)$$

Entretanto, quando existem erros de topologia, o modelo utilizado é:

$$\underline{z} = H \underline{x} + \underline{\eta}' \quad (5.2.3)$$

A equação

$$\underline{z} = H \underline{x} + \Delta H \underline{x} + \underline{\eta} \quad (5.2.4)$$

é obtida pela substituição de 5.2.1 em 5.2.2. Fazendo-se

$$\underline{\eta}' = \Delta H \underline{x} + \underline{\eta} \quad (5.2.5)$$

obtem-se um modelo do tipo da equação 5.2.3.

O vetor de resíduos é a projeção dos vetor de medidas sobre o espaço $\text{Im}(H)^\perp$, isto é:

$$\underline{r} = W \underline{z} \quad (5.2.6)$$

substituindo a equação 5.2.4 em 5.2.6 tem-se que

$$\underline{r} = W H \underline{x} + W \Delta H \underline{x} + W \underline{\eta}$$

Como o produto $W H \underline{x}$ é nulo, então

$$\underline{r} = W \Delta H \underline{x} + W \underline{\eta} \quad (5.2.7)$$

A equação 5.2.7 apresenta o vetor de resíduos dividido em duas parcelas. A primeira parcela, $W \Delta H \underline{x}$, é devida aos erros de topologia e a segunda, $W \underline{\eta}$, corresponde aos erros aleatórios inerentes aos sistemas

de medição. Para efeito da apresentação das condições de detectabilidade de erros de topologia, a componente $W \eta$ será desprezada e o vetor de resíduos é dado por:

$$\underline{r} = W \Delta H \underline{x} \quad (5.2.8)$$

O vetor de resíduos será afetado pelos erros de topologia sempre que o termo $W \Delta H \underline{x}$ for diferente de zero. Logo, esta componente é um indicador da detectabilidade dos erros de topologia, ou seja:

"Um erro topológico é detectável se

$$W \Delta H \underline{x} \neq \underline{0} \quad (5.2.9)$$

Em caso contrário, o erro é não-detectável."

5.3 Condições para a Detectabilidade de Erros de Topologia

A condição dada pela equação 5.2.9 pode ser decomposta em duas [22], a saber:

1 - O vetor \underline{x} não pertence ao espaço nulo da matriz ΔH , ou seja,

$$\underline{v} = \Delta H \underline{x} \neq \underline{0} \quad ; \quad (5.3.1)$$

2 - O vetor $\underline{v} = \Delta H \underline{x}$ não pertence ao espaço nulo da matriz W , ou seja,

$$W \underline{v} \neq \underline{0} \quad (5.3.2)$$

Para que um erro topológico seja detectável, ambas as condições acima devem ser satisfeitas.

A seguir, serão apresentados os teoremas que estabelecem as condições para a detectabilidade e não-detectabilidade de erros topológicos. Sem perda de generalidade, será focado apenas o caso de erros topológicos simples.

Teorema 1

Supondo-se que o estado \underline{x} não resulta em fluxo nulo no elemento mal configurado $i-j$, então

$$\underline{v} = \Delta H \underline{x} \neq \underline{0} , \quad (5.3.3)$$

se e somente se o elemento mal configurado estiver relacionado a pelo menos uma medida.

Demonstração:

1) Necessidade: $\underline{v} \neq \underline{0} \Rightarrow$ o elemento $i-j$ está relacionado a pelo menos uma medida.

Se $\underline{v} \neq \underline{0}$, para todo \underline{x} para os quais o fluxo de potência em $i-j$ é diferente de zero, então $\Delta H \neq [0]$. É evidente que $\Delta H \neq [0]$ implica na existência de medidas relacionadas ao elemento $i-j$.

2) Suficiência: Existem medidas relacionadas a $i-j \Rightarrow \underline{v} \neq \underline{0}$.

O produto $\Delta H \underline{x}$ fornece a aproximação linear para o fluxo de potência em $i-j$. Como, por hipótese, o fluxo em $i-j$ é diferente de zero, então

$$\underline{v} = \Delta H \underline{x} \neq \underline{0} . \quad (5.3.4)$$

Teorema 2

A condição

$$W \underline{v} \neq \underline{0} , \quad (5.3.5)$$

para todo $\Delta H \underline{x} \neq \underline{0}$, é satisfeita se e somente se pelo menos uma das medidas relacionadas ao elemento erroneamente configurado $i-j$, não for crítica.

Demonstração:

1) Necessidade: Quando se despreza a componente dos resíduos

relativa aos erros nas medidas o vetor de resíduos é dado pela equação 5.2.8 reescrita abaixo:

$$\underline{r} = W \Delta H \underline{x} \quad (5.3.6)$$

Portanto, a equação 5.3.5 implica em $\underline{r} \neq \underline{0}$. Então, existe pelo menos uma medida não-crítica relacionada ao elemento i-j, já que, como foi visto na seção 2.4, os resíduos de medidas críticas são nulos.

2) Suficiência: Se pelo menos uma das medidas relacionadas a i-j não for crítica então o vetor de resíduos resultante do erro topológico será diferente de zero. Logo, da equação 5.3.6, $W \underline{v} \neq \underline{0}$.

Teorema 3

A má configuração do elemento i-j de um sistema elétrico é não-detectável para qualquer estado \underline{x} , ou seja,

$$W \Delta H \underline{x} = \underline{0} \quad , \quad (5.3.7)$$

se e somente se uma das condições abaixo for satisfeita:

- 1 - O elemento i-j é irrelevante;
- 2 - Todas as medidas relacionadas a i-j são críticas.

Demonstração:

1 - A prova da condição 1 é trivial, já que, se o elemento i-j não estiver relacionado a nenhuma medida, a matriz ΔH será nula e, portanto,

$$\Delta H \underline{x} = \underline{0} \quad , \quad (5.3.8)$$

o que implica em 5.3.7.

2 - Se a condição dada por 5.3.7 for obedecida, então pode-se afirmar que todos os resíduos são nulos, e portanto as medidas relacionadas ao elemento mal configurado têm que ser críticas. Reciprocamente, se as medidas relacionadas ao elemento i-j forem

críticas, seus resíduos serão nulos e, de 5.2.8, $W \underline{v} = \underline{0}$.

5.4 Considerações Finais

Neste capítulo foi visto que, quando existem erros de topologia, o vetor de resíduos pode ser decomposto em duas parcelas, sendo uma correspondente aos erros nas medidas, dada por $W \underline{\eta}$, e a outra relativa aos erros de topologia, dada pelo produto $W \Delta H \underline{x}$.

As condições para a detectabilidade de erros topológicos são estabelecidas com base no produto $W \Delta H \underline{x}$, tendo em conta que, se esta parcela for nula, o vetor de resíduos não será afetado pelo erro de topologia e o erro não poderá ser detectado.

Estas condições são estabelecidas na forma de teoremas que relacionam o produto $W \Delta H \underline{x}$ com a existência de medidas relacionadas ao elemento mal configurado e com as medidas críticas que porventura existirem.

Os Teoremas 1 e 2 estabelecem as condições para a detectabilidade de um erro de topologia, sendo que o Teorema 1 mostra a necessidade da existência de medidas relacionadas ao elemento mal configurado e o Teorema 2 determina que pelo menos uma destas medidas não pode ser crítica.

O Teorema 3 estabelece a não-detectabilidade de um erro topológico e é uma generalização do teorema apresentado por Wu e Liu [22], que estabelece apenas uma condição suficiente. Isto pode ser verificado ao se analisar o sistema de 3 barras da figura 5.4.1, apresentado na citada referência como contra-exemplo da necessidade do teorema ali enunciado.

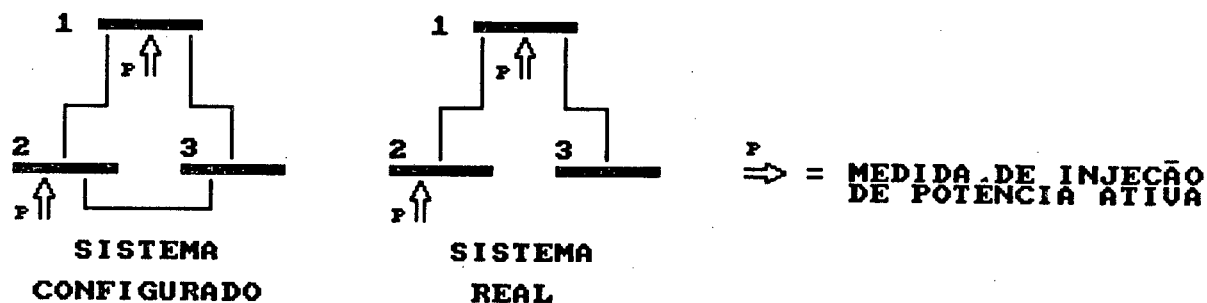


FIGURA 5.4.1

Sistema exemplo de 3 barras

A figura 5.4.1 apresenta um erro de inclusão no elemento 2-3 da rede. Verifica-se, por outro lado, que as medidas de injeção nas barras 1 e 2 são críticas. Logo, de acordo com o Teorema 3, a má configuração do elemento 2-3 não é detectável.

Finalmente, é importante ressaltar que as condições estabelecidas neste capítulo têm por base as características estruturais do plano de medição e da rede elétrica. Entretanto, sob o ponto de vista numérico, um erro de topologia pode não ser detectado se a magnitude do erro devido à má configuração de um ou mais elementos for pequena em relação ao limiar adotado no procedimento utilizado para a detecção de erros no estimador de estados.

CAPÍTULO 6

MÉTODO PARA A DETECÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE ERROS TOPOLÓGICOS

6.1 Introdução

O vetor de resíduos é igualmente afetado pelos erros nas medidas e erros de topologia. Logo, quando se levar em conta a possibilidade da presença de erros de topologia, os procedimentos de detecção de erros devem ser encarados como a constatação da existência de um problema que pode ter a sua origem em erros nas medidas ou na má configuração de elementos da rede.

Surge daí a primeira questão a ser resolvida pelo método proposto, que consiste em, dado que o problema foi detectado e as medidas por ele afetadas foram devidamente identificadas, discernir entre erros de topologia e erros nas medidas.

Posteriormente, se o problema for declarado como decorrente de erros de topologia, estes erros deverão ser localizados.

Um método que se propõe a processar erros de topologia deve ser elaborado levando-se em conta que serão aproveitadas ferramentas anteriormente utilizadas apenas no tratamento de erros grosseiros em medidas.

As principais funções a serem executadas pelo método são:

- 1 - Detecção do problema;
- 2 - Identificação das medidas suspeitas;
- 3 - Discernimento do problema - erro topológico x erro em

medidas;

4 - Localização dos erros topológicos;

5 - Supressão dos erros de topologia.

As funções 1 e 2 são realizadas utilizando os métodos já descritos no Capítulo 2, mas é importante ter em mente que as medidas identificadas são consideradas apenas suspeitas, já que ainda não se sabe se possuem erros grosseiros ou se foram identificadas por estarem sujeitas a erros de topologia.

Os itens 3 e 4 são executados simultaneamente, ou seja, os meios que permitem discernir entre erros topológicos e grosseiros já fornecem a localização dos erros de topologia caso o problema seja de configuração.

A última tarefa consiste em trocar os "status" dos elementos declarados como mal configurados e verificar se a decisão foi correta.

6.2 Teoria Básica

O desenvolvimento matemático que serve de base para o método de detecção e identificação de erros topológicos e análogo ao que é feito no Capítulo 5 e, assim como foi feito na seção 5.2, parte da equação 4.3.5, sendo que na presente seção é utilizado o modelo não-linear.

Se todos os elementos da rede estiverem configurados corretamente o modelo de medição é descrito por:

$$\underline{z} = \underline{h}^R(\underline{x}) + \underline{\eta} \quad (6.2.1)$$

Entretanto, se existirem elementos mal configurados, a solução é obtida por:

$$\underline{z} = \underline{h}(\underline{x}) + \underline{\eta}'' \quad (6.2.2)$$

e o vetor de erros $\Delta \underline{h}(\underline{x})$ é não-nulo.

Substituindo-se a equação 4.3.5 em 6.2.1 chega-se a:

$$\underline{z} = \underline{h}(\underline{x}) + \Delta\underline{h}(\underline{x}) + \underline{\eta} \quad (6.2.3)$$

e, comparando-se 6.2.3 com 6.2.2 tem-se que

$$\underline{\eta}'' = \Delta\underline{h}(\underline{x}) + \underline{\eta} \quad (6.2.4)$$

O vetor $\underline{\eta}$ contém pequenos valores aleatórios e pode ser desprezado quando comparado com $\Delta\underline{h}(\underline{x})$, logo

$$\underline{\eta}'' \cong \Delta\underline{h}(\underline{x}) \quad (6.2.5)$$

e a relação

$$\underline{r} = W \underline{\eta}'' \quad (6.2.6)$$

é válida.

Como, segundo o Capítulo 4, a partição de $\Delta\underline{h}(\underline{x})$ relativa às medidas de tensão é sempre nula, estas posições foram suprimidas de $\Delta\underline{h}(\underline{x})$ e este vetor teve a sua dimensão reduzida para o número de medidas de potência, m_{pot} .

Na seção 4.3 foi visto que os elementos não-nulos de $\Delta\underline{h}(\underline{x})$ contém os fluxos de potência nos elementos da rede configurados erroneamente. É, portanto, possível se obter uma relação entre $\Delta\underline{h}(\underline{x})$ e o vetor de fluxos de potência nestes elementos, $\underline{f}(\underline{x})$. Este vetor $\underline{f}(\underline{x})$ contém os fluxos de potência ativa e reativa em ambos os extremos de cada elemento mal configurado e possui dimensão igual ao número de fluxos nos elementos da rede, ou seja, quatro vezes o número de elementos da rede, 4ℓ .

Esta relação é dada por

$$\Delta\underline{h}(\underline{x}) = M \underline{f}(\underline{x}) \quad (6.2.7)$$

onde M é a matriz de incidência das medidas sobre os elementos da rede, de dimensão $m_{\text{pot}} \times 4\ell$.

Contudo, como o problema aqui tratado não consiste em analisar pequenas variações de fluxo, mas sim a configuração ou não de um

elemento da rede, o vetor $\underline{f}(\underline{x})$ pode ser substituído pelo vetor de fluxos reduzido $\underline{f}^r(\underline{x})$ de dimensão $l \times 1$, e a relação dada pela equação 6.2.7 se torna:

$$\Delta \underline{h}(\underline{x}) = M^r \underline{f}^r(\underline{x}) \quad , \quad (6.2.8)$$

onde M^r é a matriz obtida pela redução correspondente nas colunas de M . No Apêndice II é mostrado como é feita esta redução e como a matriz M^r é montada.

Quando se substitui a equação 6.2.8 em 6.2.5 verifica-se que o vetor de erros $\underline{\eta}''$ torna-se:

$$\underline{\eta}'' = M^r \underline{f}^r(\underline{x}) \quad (6.2.9)$$

e a relação dada por 6.2.6 pode ser escrita na forma abaixo:

$$\underline{r} = W M^r \underline{f}^r(\underline{x}) \quad . \quad (6.2.10)$$

A matriz obtida pelo produto $W M^r$ estabelece uma relação entre os resíduos e os fluxos nos elementos da rede. Esta matriz, denotada por WM , é chamada de matriz de sensibilidade dos resíduos em relação aos fluxos nos elementos.

A relação dada pela equação 6.2.10 pode ser estendida aos resíduos normalizados definindo-se a matriz de sensibilidade dos resíduos normalizados em relação aos fluxos nos elementos, S , que surge da normalização de ambos os termos da equação 6.2.10, que fornece

$$S = [\text{diag}(C)]^{-1/2} W M^r \quad , \quad (6.2.11)$$

onde C é a matriz de covariâncias dos resíduos definida no Capítulo 2, e resulta em

$$\underline{r}^N = S \underline{f}^r(\underline{x}) \quad . \quad (6.2.12)$$

O método descrito na seção seguinte se baseia no fato de que, dado que existe um único elemento $i-j$ mal configurado, o vetor de resíduos normalizados será dado por:

$$\underline{r}^N = f_{i-j}^r(\underline{x}) \underline{s}_{i-j} \quad (6.2.13)$$

onde \underline{s}_{i-j} é a coluna de S correspondente ao elemento i-j e $f_{i-j}^r(\underline{x})$ é o escalar correspondente ao fluxo neste elemento. Assim sendo conclui-se que os maiores resíduos normalizados correspondem aos elementos de \underline{s}_{i-j} que possuem maior magnitude e as medidas associadas a estes resíduos são as mais indicadas a serem identificadas como suspeitas.

Se o erro topológico for múltiplo, o vetor de resíduos será uma combinação linear das colunas de S relativas aos elementos mal configurados e a conclusão acima permanece válida.

6.3 Método Proposto

Esta seção tem o objetivo de descrever com detalhes as tarefas a serem executadas pelo método proposto para o processamento de erros de topologia.

Estas funções são descritas a seguir:

1 - Detecção do problema e identificação das medidas suspeitas

A detecção do problema e identificação das medidas suspeitas são realizadas logo após a estimação de estados e consistem no mesmos procedimentos utilizados para a detecção e identificação de erros grosseiros em medidas . A diferença reside apenas na interpretação dos resultados da detecção: constata-se a presença de erro mas ainda não se pode afirmar se esta constatação se deu em consequência de erros grosseiros em medidas ou de erros topológicos.

As medidas acusadas no processo de identificação constituem o conjunto de medidas suspeitas, SPT , a ser utilizado na próxima etapa.

2 - Discernimento entre Erro Grosseiro x Erro Topológico e localização dos elementos mal configurados

Esta etapa da metodologia proposta utiliza a relação de sensibilidade entre os resíduos normalizados e os erros de topologia definida pela matriz S.

Cada coluna da matriz S corresponde a um elemento da rede e estabelece a relação de sensibilidade entre os resíduos e os fluxos de potência nos elementos (ver equação 6.2.13). É possível então, partindo de S, associar a cada elemento da rede um conjunto de medidas sensíveis à sua má configuração. Assim, seja SSV_{i-j} o conjunto das medidas sensíveis a um erro de configuração no elemento i-j. Se R_{i-j} é o número de medidas relacionadas ao elemento i-j (ver seção 4.2), então define-se como SSV_{i-j} como o conjunto formado pelas medidas correspondentes aos elementos da coluna s_{i-j} que apresentam os R_{i-j} maiores valores absolutos.

Os elementos do conjunto SSV_{i-j} podem ser interpretados como o conjunto de medidas que se espera que sejam identificadas como suspeitas quando o elemento i-j estiver mal configurado. Portanto, a intersecção de cada SSV_{i-j} com o conjunto de medidas suspeitas SPT fornece uma indicação da "probabilidade" que cada elemento tem de estar mal configurado.

A intersecção dos conjuntos SSV_{i-j} com SPT permite atribuir a cada elemento da rede um índice e_{i-j} . Estes índices são calculados da seguinte forma:

a) Obter as intersecções

$$I_{i-j} = SPT \cap SSV_{i-j} \quad (6.3.1)$$

para todo elemento i-j.

b) Calcular os índices e_{i-j} dados por:

$$e_{i-j} = \frac{NI_{i-j}}{R_{i-j}} \quad (6.3.2)$$

onde NI_{i-j} é o número de elementos em I_{i-j} e R_{i-j} é o número de medidas relacionadas ao elemento $i-j$.

A decisão entre a presença de erros grosseiros ou de erros de topologia é tomada comparando-se cada índice e_{i-j} com um limiar λ . Se existir algum e_{i-j} tal que

$$e_{i-j} \geq \lambda \quad , \quad 0 \leq \lambda \leq 1 \quad , \quad (6.3.3)$$

então o elemento $i-j$ é considerado suspeito de estar mal configurado e o problema detectado é declarado como decorrente de erros de topologia. Em caso contrário, o problema é tratado como resultante de erros grosseiros em medidas.

3 - Processamento dos elementos suspeitos

Partindo-se do princípio de que o teste dado pela equação 6.3.3 foi positivo para um ou mais elementos, então o "status" do elemento que tem maior índice, e_{i-j} , é modificado e uma nova estimacão é realizada de modo a validar a suspeita de má configuracão do elemento. Este procedimento é repetido até que não haja mais elementos suspeitos de estarem mal configurados .

Se dois índices possuírem o mesmo valor, então o elemento a ser processado é aquele que estiver relacionado a mais medidas.

O fluxograma apresentado na figura 6.3.1 mostra as principais funções do método proposto.

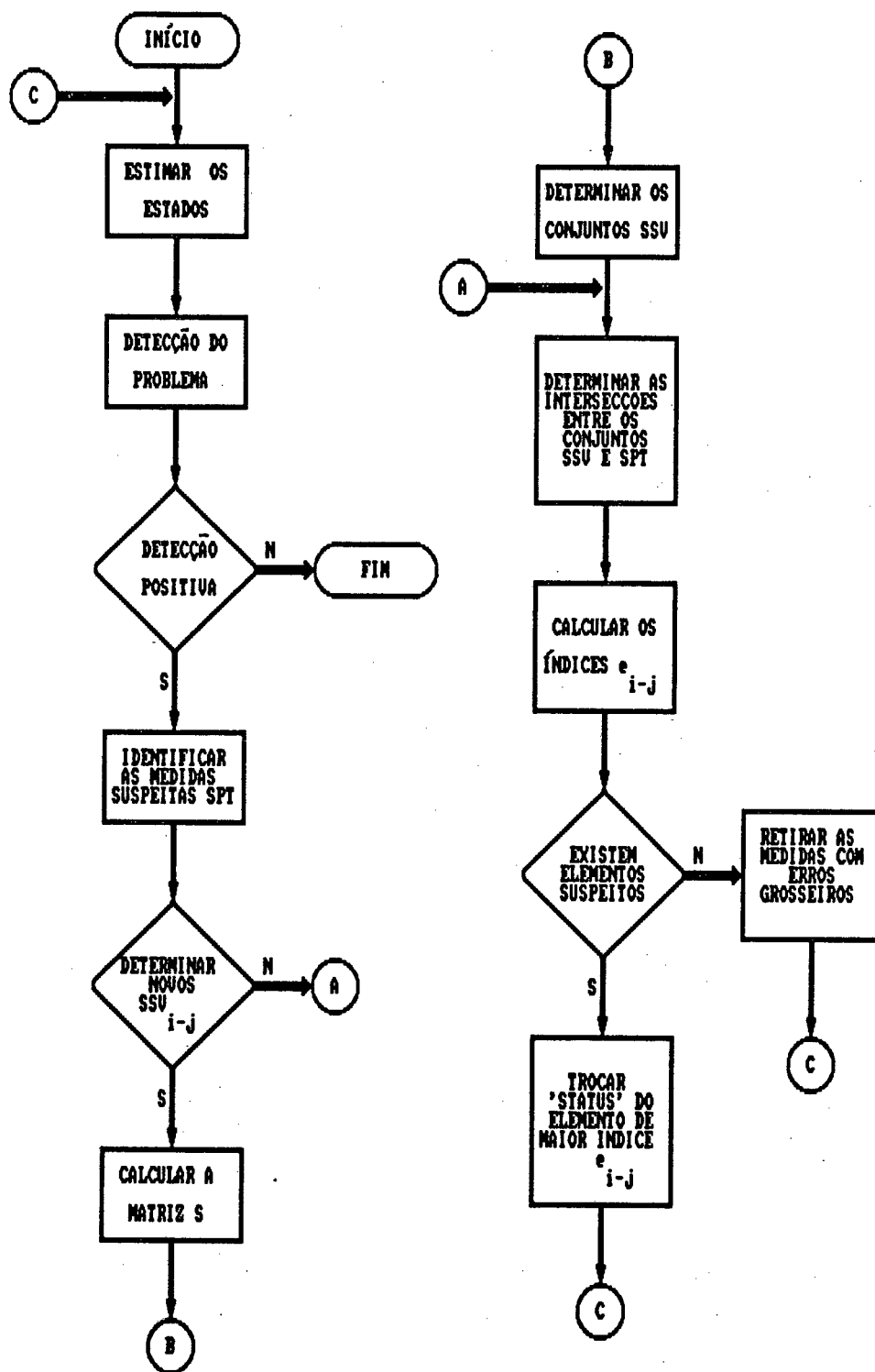


FIGURA 6.3.1

Fluxograma do método proposto para o tratamento de erros de topologia

6.4 Algumas Considerações Sobre o Método Proposto

Esta seção tem por objetivo tecer algumas considerações adicionais sobre o método descrito na seção anterior.

Primeiramente é importante justificar porque foi estabelecido que o número de medidas pertencentes aos conjuntos SSV_{1-j} é igual a R_{1-j} . Esta escolha foi feita baseada nas seguintes propriedades da matriz de sensibilidade W [24]:

- W é idempotente, isto é, $W^2 = W$;
- O posto de W , $\rho(W)$ é dado por

$$\rho(W) = m - n \quad , \quad (6.4.1)$$

onde m é o número de medidas e n é o número de estados do sistema.

Considerando que a redundância do sistema de telemedição tende para valores extremamente altos, tem-se que $m \gg n$ e portanto

$$\rho(W) \rightarrow m \quad . \quad (6.4.2)$$

No limite, portanto, a matriz W será não-singular.

Como a única matriz idempotente não-singular é a matriz identidade [25], a tendência indicada pela equação 6.4.2 resulta em:

$$W \rightarrow I \quad . \quad (6.4.3)$$

Neste caso, a matriz de sensibilidade S se tornará:

$$S = [\text{diag}(C)]^{-1/2} M \quad (6.4.4)$$

ou seja, cada coluna de S é resultante de uma combinação linear das colunas da matriz diagonal $[\text{diag}(C)]^{-1/2}$ e a matriz S possui a mesma estrutura de M , o que faz com que os únicos elementos não-nulos em cada coluna de S sejam aqueles correspondentes às medidas relacionadas aos respectivos elementos. Portanto, nestas condições ideais de redundância, os componentes dos conjuntos de medidas sensíveis, SSV_{1-j} , coincidem com as medidas relacionadas a cada elemento da rede.

Por outro lado, a baixa redundância implica na existência de medidas críticas, que afetam a identificabilidade das medidas suspeitas, já que as medidas críticas possuem resíduos nulos. Entretanto esta informação já está contida na matriz S através da relação de sensibilidade que ele representa.

Outro aspecto a ser considerado é a existência de conjuntos críticos de medidas. Os conjuntos críticos podem provocar um "desencontro" entre os conjuntos de medidas sensíveis e suspeitas, prejudicando a localização dos elementos suspeitos de estarem configurados erroneamente.

Estas falhas na identificação de elementos suspeitos ocorrem porque os resíduos de medidas pertencentes a conjuntos críticos são igualmente sensíveis aos erros de topologia, podendo levar a conjuntos SSV_{1-j} diferentes dos esperados e podendo também afetar a formação do conjunto de medidas suspeitas, SPT.

A determinação do valor ideal para λ na equação 6.3.3 também merece ser discutida. Este limiar depende bastante do nível de redundância do plano de medição e deve ser ajustado caso a caso, de modo a permitir um discernimento correto entre erros grosseiros e erros topológicos e localizar com uma precisão satisfatória os elementos suspeitos.

O método proposto também está sujeito a efeitos indesejáveis devidos à ocorrência de erros grosseiros em medidas simultâneos ou não aos erros de topologia. Prevê-se que a ocorrência de erros grosseiros simples ou de erros múltiplos distribuídos pelo sistema não deve causar problemas para o método proposto se o sistema possuir um bom nível de redundância nas medidas. No entanto, se ocorrerem erros grosseiros múltiplos concentrados em um ponto do sistema, devido a, por exemplo,

falhas em uma unidade terminal remota, o método poderá, eventualmente, considerar tais erros como consequência de erros de topologia. Contudo, este tipo de situação é facilmente notada com a persistência dos erros após a troca de "status" dos elementos considerados suspeitos.

6.5 Considerações Finais

Neste capítulo foi visto apresentado um método que se baseia na sensibilidade dos resíduos normalizados em relação aos fluxos nos elementos da rede visando a detecção da existência de erros, discerní-los entre erros topológicos e erros em medidas e, caso sejam topológicos, localizá-los.

Inicialmente é feito o desenvolvimento matemático que fornece a base teórica para o método proposto, descrito em seguida com detalhes.

Finalmente são feitas algumas considerações a respeito do método e do seu desempenho com relação às características do plano de medição.

CAPÍTULO 7

SIMULAÇÕES E RESULTADOS

7.1 Introdução

O método proposto no capítulo anterior foi implementado computacionalmente e testado através de simulações de diversos tipos de erros de topologia em sistemas elétricos previamente utilizados na literatura.

O presente capítulo tem por objetivo descrever como foram realizadas as simulações de erros topológicos e apresentar os resultados obtidos nestas simulações, juntamente com as suas respectivas análises.

Primeiramente é feita uma breve apresentação dos programas de computador utilizados nas simulações e suas respectivas funções, além de uma descrição da estratégia utilizada para se simular os erros.

Em seguida os resultados das simulações são apresentados e são feitos comentários a respeito do que foi obtido .

Os erros de topologia foram simulados em dois sistemas de potência: os sistemas IEEE de 14 barras e de 30 barras.

7.2 Estratégias de Simulação Utilizadas

As simulações dos erros de topologia foram feitas com o uso de quatro programas de computador. Esta cadeia computacional tem por objetivo simular o sistema de potência e o plano de medição, estimar os

estados e determinar os índices e_{1-j} para cada elemento da rede.

O fluxo dos dados é mostrado no diagrama de blocos da figura 7.2.1 juntamente com a função de cada programa.

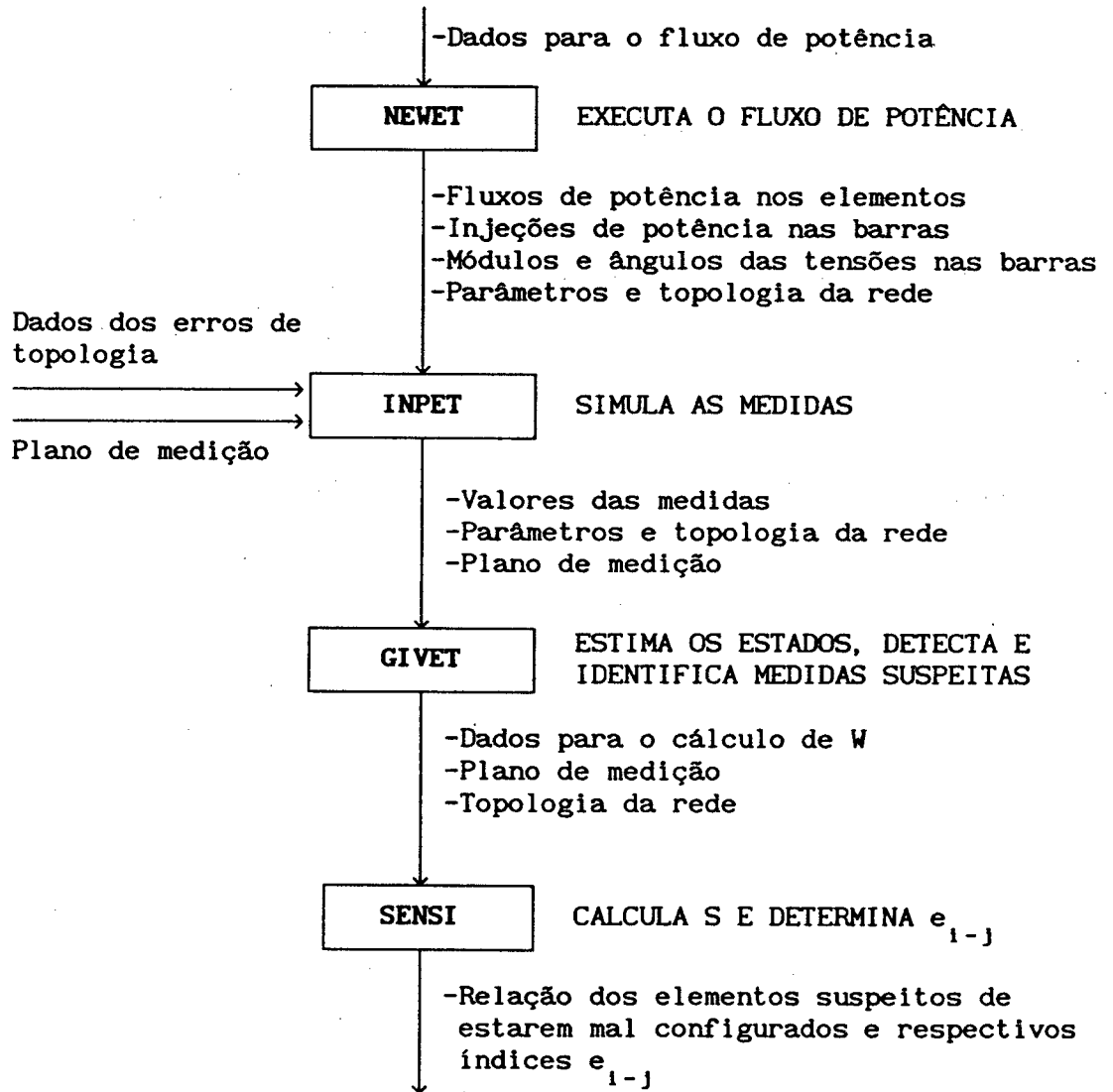


FIGURA 7.2.1

Diagrama de blocos que apresenta o fluxo de dados na cadeia de programas que simula erros de topologia na EESP

Os programas utilizados nas simulações são descritos a seguir:

- Programa NEWET

Este programa executa o fluxo de potência do sistema e determina os fluxos e injeções de potência ativa e reativa que caracterizam as condições de operação do sistema real.

O arquivo de entrada deste programa deve conter os dados dos elementos e os dados de barras.

O programa NEWET gera um arquivo que contém os dados para a execução do próximo programa, INPET.

- Programa INPET

A função deste programa é simular a imprecisão dos medidores, inserindo nos valores reais das grandezas físicas, gerados pelo programa NEWET, erros aleatórios de distribuição normal que são dependentes das características dos aparelhos simulados.

Este programa também tem como opção a simulação de erros grosseiros em medidas.

Os dados de entrada do programa INPET são:

- Módulo e ângulo das tensões das barras do sistema;
- Injeções de potência ativa e reativa em cada barra do sistema;
- Fluxos de potência ativa e reativa nos elementos da rede;
- Os parâmetros e topologia da rede elétrica;
- O tipo e a localização dos medidores e as suas precisões.

Além destes dados, o programa INPET recebe as informações a respeito dos elementos da rede que serão configurados erroneamente. Estes dados são os números de identificação dos elementos, se for erro de exclusão, e os dados de linha e as barras terminais, se o erro for de inclusão.

- Programa GIVET

Este é o programa que implementa o estimador de estados.

Os dados necessários para a execução deste programa são gerados pelo programa INPET e consistem na localização e valor de cada medida, além da topologia e dos parâmetros da rede.

O programa GIVET também processa erros grosseiros múltiplos através do método de testes de hipóteses descrito no capítulo 2 [1][2], e determina medidas críticas por comparação numérica dos resíduos.

A estimação de estados é feita pelo Método de Rotações de Givens [2].

- Programa SENSI

O arquivo de entrada deste programa é gerado pelo programa GIVET e contém, basicamente, os dados para o cálculo da matriz de sensibilidade W e o plano de medição, além das medidas declaradas suspeitas pelo programa GIVET.

Este é o último programa da cadeia e a sua função é calcular a matriz de sensibilidade dos resíduos em relação aos fluxos nos elementos, S , e então determinar os índices e_{i-j} para cada elemento da rede.

Os erros topológicos de exclusão ou de inclusão são simulados com a exclusão ou inclusão dos elementos em questão no arquivo de dados de entrada do programa INPET, após a execução do fluxo de potência pelo programa NEWET, ou seja, depois da simulação do sistema real em operação.

Na simulação de erros de inclusão foram consideradas as medidas de fluxo que forem eventualmente realizadas sobre o elemento. No caso da sua existência, estas medidas foram incluídas com valor igual a zero, já que, na realidade, o elemento está fora de operação e o fluxo de

potência é nulo.

7.3 Resultados

Os resultados foram obtidos através de simulações de diferentes tipos de erros de topologia nos sistemas IEEE de 14 barras e IEEE de 30 barras na tentativa de englobar as mais diversas situações que podem ocorrer em um sistema real.

As subseções 7.3.1 a 7.3.5 apresentam os resultados das simulações de erros topológicos de exclusão simples nos elementos dos sistemas IEEE de 14 barras e de 30 barras, com diferentes planos de medição.

Para ilustrar os casos de erros simples de inclusão, a subseção 7.3.6 apresenta os resultados das simulações deste tipo de erros no sistema IEEE de 14 barras.

Erros topológicos múltiplos também foram simulados e o desempenho do método proposto frente a estes erros está apresentado nas subseções 7.3.7 e 7.3.8 sendo que, nesta última, o erro simulado é do tipo seccionamento de barra ("Bus Split").

7.3.1 Erros Topológicos de Exclusão Simples

Sistema IEEE de 14 barras com 45 medidas

Esta subseção apresenta os resultados obtidos pela simulação da exclusão indevida dos elementos do sistema IEEE de 14 barras com um plano de medição de redundância igual a 1,67, ou seja, neste caso a redundância do sistema é relativamente baixa.

O sistema utilizado nas simulações com o seu respectivo plano

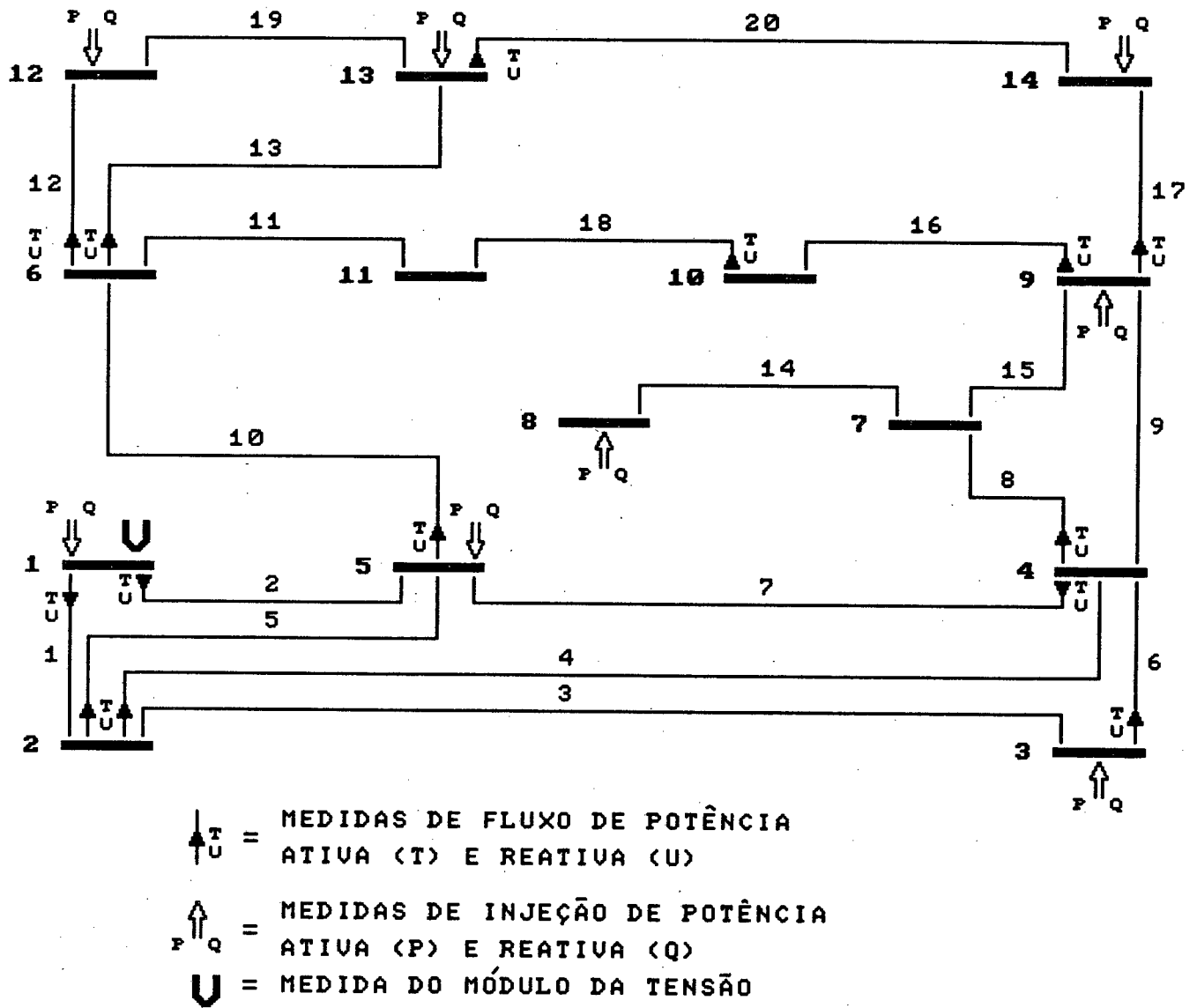


FIGURA 7.3.1.1

Sistema IEEE de 14 barras com plano de medição de 45 medidas

de medição estão apresentados na figura 7.3.1.1.

As medidas e os conjuntos críticos do sistema da figura 7.3.1.1 estão na tabela 7.3.1.1.

A simulação de erro de exclusão só foi possível quando a retirada dos elementos e das suas eventuais medidas de fluxo não provocou a perda da observabilidade e/ou conectividade do sistema ou quando a convergência do programa estimador de estados não foi dificultada.

TABELA 7.3.1.1
RELAÇÃO DE MEDIDAS E CONJUNTOS CRÍTICOS DO
SISTEMA IEEE DE 14 BARRAS COM 45 MEDIDAS

	MEDIDAS DE POTENCIA ATIVA	MEDIDAS DE POTENCIA REATIVA
MEDIDAS CRÍTICAS	P8, T10-11	Q8, U10-11, U1
CONJUNTOS CRÍTICOS	P3, T3-4 P9, T4-7, T9-10	Q3, U3-4 Q9, U4-7, U9-10

A seguir é apresentada a análise dos resultados da tabela 7.3.1.2. A coluna de medidas críticas desta tabela mostra a relação das medidas que se tornaram críticas com a exclusão do elemento e após a retirada das medidas consideradas suspeitas.

- elemento 1 (1-2)

A simulação da exclusão do elemento 1 (1-2) resulta em um único índice não-nulo $e_{1-2} = 0,5$, que indica que o elemento 1-2 está mal configurado.

- elemento 2 (1-5)

A exclusão do elemento 2 (1-5) e a consequente retirada das medidas t_{1-5} e u_{1-5} do plano de medição gera novos conjuntos críticos: p_1 , t_{1-2} e q_1, u_{1-2} . Isto explica a presença de u_{1-2} entre as medidas sensíveis à má configuração do elemento 2 (1-5), o que fez com que a intersecção entre os conjuntos SPT e SSV_{1-5} se limitasse à medida q_1 provocando um baixo índice $e_{1-5} = 0,25$.

- elemento 3 (2-3)

Quando o elemento 3 (2-3) é excluído da rede os pares de medidas t_{3-4} , p_3 e u_{3-4} , q_3 se tornam conjuntos críticos. Isto faz com que o conjunto SSV_{2-3} contenha as medidas u_{3-4} e q_3 , que são igualmente sensíveis à má configuração de 3 (2-3).

Esta simulação faz com que os elementos 3 (2-3) e 6 (3-4) sejam considerados suspeitos com índices iguais a 0,5, o que dificulta a localização do erro topológico.

- elemento 4 (2-4)

Este elemento é irrelevante e nenhuma medida é declarada suspeita, assim como acontece com os elementos 8 (4-7) e 11 (6-12).

- elemento 5 (2-5)

Neste caso apenas o elemento excluído foi considerado suspeito com $e_{2-5} = 0,5$. Este resultado é bastante satisfatório, tendo-se em conta que o elemento em questão está relacionado apenas às medidas p_5 e q_5 .

TABELA 7.3.1.2
 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE ERROS TOPOLÓGICOS DE EXCLUSÃO SIMPLES
 NO SISTEMA IEEE DE 14 BARRAS COM 45 MEDIDAS

ELEMENTO EXCLUÍDO	MEDIDAS RELACIONADAS	MEDIDAS SENSÍVEIS SSV _{i-j}	MEDIDAS SUSPEITAS SPT	MEDIDAS CRÍTICAS	ELEMENTOS SUSPEITOS (e _{i-j})
1 (1-2)	P1, Q1	Q1, U1-5	P1, Q1	-	1(0,5)
2 (1-5)	P1, P5, Q1, Q5	Q1, U1-2 Q5, U4-5	P5, P1 Q1, U1	T5-6, T1-2 U1-2	1(0,5), 2(0,25)
3 (2-3)	P3, Q3	U3-4, Q3	T3-4, U3-4	P3, Q3	3(0,5), 6(0,5)
4 (2-4)	IRRELEVANTE	-	-	-	-
5 (2-5)	P5, Q5	Q5, U4-5	P5, U1, Q5	-	5(0,5)
6 (3-4)	P3, Q3	T1-2, T1-5	-	P3, Q3	-
7 (4-5)	P5, Q5	Q5, P5	P5, U1, P9	U4-7, U9-10	7(0,5), 13(0,25) 16(0,25), 17(0,17)
8 (4-7)	IRRELEVANTE	-	-	-	-
9 (4-9)	P9, Q9	U4-7, U9-10	P9	T9-10, T4-7	8(0,5), 10(0,25) 16(0,25)
10 (5-6)	P5, Q5	Q5, U4-5	P5, U1, Q5	T4-7, T9-10 U4-7, U9-10 P9, Q9	10(0,5)
11 (6-11)	IRRELEVANTE	-	-	-	-
12 (6-12)	P12, Q12	P12, Q12	P12, Q12	P13, Q13	12(1,0), 19(0,5)
13 (6-13)	P13, Q13	P13, Q13	P13, Q13	-	13(1,0)

TABELA 7.3.1.2 <CONTINUAÇÃO>
 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE ERROS TOPOLÓGICOS DE EXCLUSÃO SIMPLES
 NO SISTEMA IEEE DE 14 BARRAS COM 45 MEDIDAS

ELEMENTO EXCLUÍDO	MEDIDAS RELACIONADAS	MEDIDAS SENSÍVEIS SSV _{i-J}	MEDIDAS SUSPEITAS SPT	MEDIDAS CRÍTICAS	ELEMENTOS SUSPEITOS (e _{i-J})
15 <7-9>	P9, Q9	U9-10, Q9	P9, Q9	T4-7; U4-7 T9-10 U9-10	9<0,5>; 10<0,5> 15<0,5>; 16<0,5> 17<0,33>; 20<0,17>
17 <9-14>	P9, P14, Q9, Q14	Q14, P14 U13-14 T13-14	P14, Q14	T4-7; T9-10 U4-7; U9-10 P9; Q9	17<0,5>, 20<0,33>
19 <12-13>	P12, P13 Q12, Q13	P12, Q12 U6-12, T6-12	P12, P13	T6-12	12<0,25>, 19<0,25>
20 <13-14>	P13, P14 Q13, Q14	Q14, P14 U9-14, T9-14	P14, P13	T4-7; T9-10 U4-7; U9-10 P9; Q9 T9-14	12<0,25>, 13<0,25> 17<0,17>, 20<0,25>

- elemento 6 (3-4)

Com a exclusão do elemento 6 (3-4), as medidas p_3 e q_3 , a ele relacionadas, se tornam críticas, fazendo com que nenhuma medida seja declarada suspeita.

Esta situação já estava prevista pelo Teorema 3 do capítulo 5, que estabelece como condição para a não-detectabilidade que todas as medidas relacionados ao elemento mal configurado sejam críticas.

- elemento 7 (4-5)

Vários elementos foram declarados suspeitos neste caso sendo que o maior índice se refere ao elemento 7 (4-5) mal configurado.

- elemento 9 (4-9)

O conjunto de medidas sensíveis SSV_{4-9} é composto pelas medidas u_{4-7} e u_{9-10} que, segundo a tabela 7.3.1.1, formam conjunto crítico com a medida q_9 relacionada ao elemento mal configurado. Como apenas a medida p_9 foi identificada como suspeita, a interseccção de SPT com SSV_{4-9} é um conjunto vazio e o elemento 9 (4-9) não é considerado suspeito.

- elemento 10 (5-6)

A retirada do elemento 10 (5-6) amplia consideravelmente a quantidade de medidas críticas.

O único elemento considerado suspeito é o elemento 10 (5-6) com um índice $e_{5-6} = 0,5$.

- elemento 12 (6-12)

Neste caso o elemento excluído é considerado suspeito com índice $e_{6-12} = 1,0$, ou seja, todas as medidas sensíveis foram declaradas suspeitas e o erro de configuração fica evidente, mesmo existindo outro elemento declarado suspeito.

- elemento 13 (6-13)

É uma situação semelhante à analisada anteriormente. Neste caso apenas o elemento 13 (6-13) foi declarado suspeito com $e_{6-13} = 1,0$.

- elemento 15 (5-9)

A presença da medida u_{9-10} entre as medidas sensíveis ocorre porque, segundo a tabela 7.3.3.1, esta medida forma um conjunto crítico com q_9 e u_{4-7} . Isto faz com que, apesar das medidas relacionadas a 15 (5-9) terem sido identificadas como portadoras de erro, outros elementos sejam apontados como suspeitos.

- elemento 17 (9-14)

Neste caso, com a exclusão do elemento 17 (9-14), as medidas p_9 e q_9 se tornam críticas e, portanto, apenas as medidas p_{14} e q_{14} transmitem o erro, sendo apontadas como suspeitas.

- elemento 19 (12-13)

Após a exclusão do elemento 19 (12-13), os pares de medidas t_{6-12} , p_{12} e u_{6-12} , p_{12} se tornam conjuntos críticos, fazendo com que as medidas t_{6-12} e u_{6-12} sejam sensíveis à má configuração simulada e resultando em um baixo índice $e_{12-13} = 0,25$.

- elemento 20 (13-14)

Esta situação é análoga à exclusão do elemento 19 (12-13).

A exclusão de 20 (13-14) faz com que os pares de medidas p_{14} , t_{9-14} e q_{14} , u_{9-14} se tornem conjuntos críticos e as medidas p_{13} e q_{13} não pertencem à SSV_{13-14} como era de se esperar. Isto faz com que vários elementos sejam declarados como suspeitos e com que o índice e_{13-14} seja baixo.

7.3.2 Erros Topológicos de Exclusão Simples

Sistema IEEE de 14 barras com 86 medidas

O plano de medição apresentado na figura 7.3.2.1 contém todas as medidas de injeção de potência e de módulo da tensão e todos os elementos têm seus fluxos de potência medidos em pelo menos uma das suas extremidades, exceto o elemento 14 (7-8) cujos fluxos de são medidos em ambas as extremidades. Nenhuma das medidas deste plano de medição é crítica.

A tabela 7.3.2.1 apresenta os resultados obtidos pela simulação da exclusão de cada elemento do sistema, com exceção do elemento 14(7-8) cuja retirada provoca a perda de conectividade da rede.

Em todos os casos simulados os maiores índices e_{i-j} correspondem aos elementos excluídos, exceto no caso do elemento 19 (12-13) em que a má configuração não foi detectada.

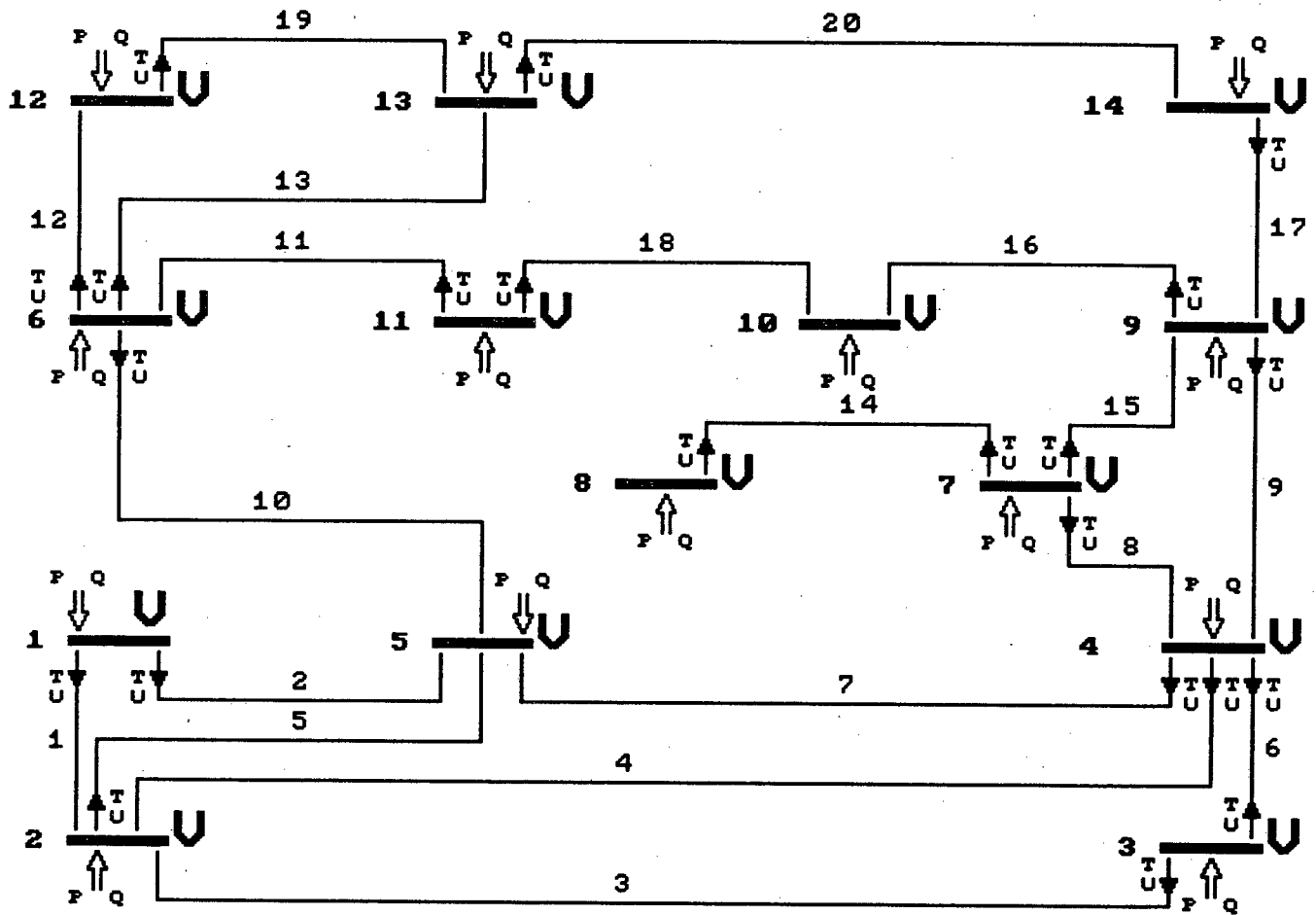


FIGURA 7.3.2.1

Sistema IEEE de 14 barras com plano de medição de 86 medidas

RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE ERROS TOPOLÓGICOS DE EXCLUSÃO SIMPLES
NO SISTEMA IEEE DE 14 BARRAS COM 86 MEDIDAS

ELEMENTO EXCLUÍDO	MEDIDAS RELACIONADAS	MEDIDAS SENSÍVEIS SSV _{i-j}	MEDIDAS SUSPEITAS SPT	ELEMENTOS SUSPEITOS (e_{i-j})
1 (1-2)	P1, P2, Q1, Q2	Q1, U1-5, P2, Q2	P2, P1, T1-5, T2-5 P3, T3-2, P4, Q2 U1-5, Q2-5, Q5	1(1,0), 2(0,33), 3(0,17) 4(0,5), 5(0,5), 6(0,25) 7(0,5), 14(0,25)
2 (1-5)	P1, P5, Q1, Q5	Q1, U1-2, Q5, P5	P5, P1, Q1	2(0,5), 14(0,125)
3 (2-3)	P2, P3, Q2, Q3	Q3, P3, Q2, P2	P3, P2 Q2, Q3	3(1,0), 6(0,25)
4 (2-4)	P2, P4, Q2, Q4	Q4, Q2, P4, U4-5	P4, P2, Q2	4(0,5), 14(0,125)
5 (2-5)	P2, P5, Q2, Q5	Q5, P5, P2, T4-5	P5, P2, T1-2 T1-5, Q5, P1	1(0,17), 2(0,33), 5(0,5) 7(0,33), 14(0,125)
6 (3-4)	P3, P4, Q3, Q4	Q3, P3, U3-2, Q4	P3, P4, Q3	3(0,167), 6(0,5), 14(0,125)
7 (4-5)	P4, P5, Q4, Q5	Q5, Q4, P5, P4	P4, P5, Q4	7(0,75), 14(0,125)
8 (4-7)	P4, P7, Q4, Q7	Q7, P7, Q4, T7-9	P7, P4, Q7	8(0,5)
9 (4-9)	P4, P9, Q4, Q9	Q9, P9, Q4, P4	P9, P4, Q4	9(0,75), 14(0,125)
10 (5-6)	P5, P6, Q5, Q6	Q5, Q6, P6, P5	P6, P5, Q5	7(0,167), 10(0,75)
11 (6-11)	P6, P11, Q6, Q11	Q11, P11, Q6, P6	P11, P6 Q11, Q6	11(1,0), 16(0,167)
12 (6-12)	P6, P12, Q6, Q12	P12, Q12 U12-13, T12-13	P12, P6 Q12, Q6	12(0,5), 19(0,33)
13 (6-13)	P6, P13, P6, Q13	P13, Q13, Q6, P6	P13, P6 Q13, Q6	13(1,0), 14(0,125)

TABELA 7.3.2.1 (continuação)
**RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE ERROS TOPOLÓGICOS DE EXCLUSÃO SIMPLES
 NO SISTEMA IEEE DE 14 BARRAS COM 86 MEDIDAS**

ELEMENTO EXCLUÍDO	MEDIDAS RELACIONADAS	MEDIDAS SENSÍVEIS SSU _{i-j}	MEDIDAS SUSPEITAS SPT	ELEMENTOS SUSPEITOS (e _{i-j})
15 (7-9)	P7, P9, Q7, Q9	Q7, P7, Q9, P9	P7, P9, Q7, Q9	8(0,17), 9(0,17), 15(1,0)
16 (9-10)	P9, P10, Q9, Q10	Q10, P10, Q9, P9	P10, Q10, P9, Q9	11(0,17), 16(1,0), 18(0,33)
17 (9-14)	P9, P14, Q9, Q14	Q14, P14, Q9, P9	P14, P9, Q14, Q9	17(1,0), 20(0,33)
18 (10-11)	P10, P11 Q10, Q11	Q11, Q10 P11, P10	P10, P11	11(0,17), 16(0,17), 18(0,5)
19 (12-13)	P12, P13 Q12, Q13	Q12, P12 Q13, P13	-	-
20 (13-14)	P13, P14 Q13, Q14	Q14, P14 Q13, P13	P14, P13, Q13	17(0,17), 20(0,75)

7.3.3 Erros Topológicos de Exclusão Simples

Sistema IEEE de 14 barras com 122 medidas

A tabela 7.3.3.1 apresenta os resultados obtidos pela simulação de erros topológicos de exclusão simples dos elementos do sistema IEEE de 14 barras com 122 medidas (figura 7.3.3.1), ou seja, com o plano de medição completo. Portanto, obviamente este sistema não possui medidas ou conjuntos críticos.

Pela tabela 7.3.3.1 verifica-se que, em todos os casos simulados, o elemento excluído tem o maior índice e_{i-j} entre os elementos suspeitos e, em vários casos estes índices foram iguais a 1, demonstrando o bom desempenho do método proposto em sistemas com alta redundância de medidas.

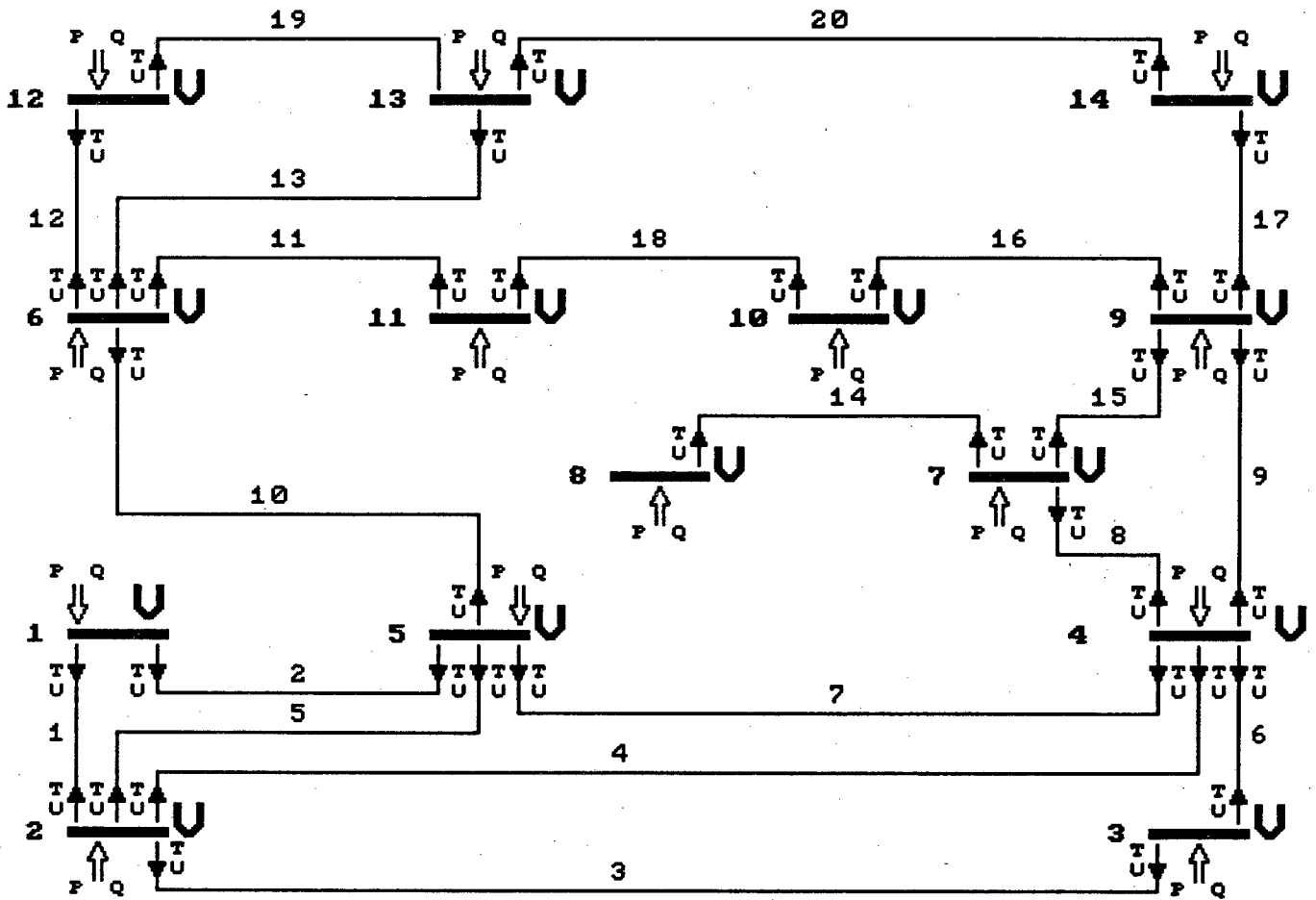


FIGURA 7.3.3.1

Sistema IEEE de 14 barras com plano de medição de 122 medidas

TABELA 7.3.3.3.1

RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE ERROS TOPOLÓGICOS DE EXCLUSÃO SIMPLES
NO SISTEMA IEEE DE 14 BARRAS COM 122 MEDIDAS (PLANO DE MEDIÇÃO COMPLETO)

ELEMENTO EXCLUÍDO	MEDIDAS RELACIONADAS	MEDIDAS SENSÍVEIS SSV _{i-j}	MEDIDAS SUSPEITAS SPT	ELEMENTOS SUSPEITOS (e_{i-j})
1 (1-2)	P1, P2, Q1, Q2	Q1, Q2, P2, U1-5	P2, P1, Q2, Q1 U4-2, U5-2 Q3, U3-2, Q4	1(0,75), 2(0,125), 3(0,125) 4(0,25), 5(0,25), 6(0,125) 7(0,125), 14(0,125)
2 (1-5)	P1, P5, Q1, Q5	Q1, Q5, P5, U1-2	P5, P1, Q1	1(0,125), 2(0,5)
3 (2-3)	P2, P3, Q2, Q3	Q3, P3, Q2, P2	P3, P2, Q2, Q3	3(1,0), 6(0,25)
4 (2-4)	P2, P4, Q2, Q4	Q4, Q2, P4, P2	P4, P2, Q2, Q4	4(1,0), 14(0,125)
5 (2-5)	P2, P5, Q2, Q5	Q5, P5, Q2, P2	P5, P2, Q5, Q2	2(0,125), 5(1,0) 7(0,125), 14(0,125)
6 (3-4)	P3, P4, Q3, Q4	Q3, P3, Q4, P4	P3, P4, Q3	3(0,25), 6(0,75)
7 (4-5)	P4, P5, Q4, Q5	Q5, Q4, P5, P4	P5, P4, Q4, Q5	7(1,0), 14(0,125)
8 (4-7)	P4, P7, Q4, Q7	Q7, P7, Q4, P4	P7, P4, Q7	8(0,75), 14(0,125) 15(0,125)
9 (4-9)	P4, P9, Q4, Q9	Q9, P9, Q4, P4	P9, P4, Q4	9(0,75)
10 (5-6)	P5, P6, Q5, Q6	Q5, Q6, P6, P5	P6, P5, Q5	7(0,125), 10(0,75)
11 (6-11)	P6, P11, Q6, Q11	Q11, P11, Q6, P6	P11, P6 Q11, Q6	11(1,0), 16(0,125) 18(0,125)
12 (6-12)	P6, P12, Q6, Q12	P12, Q12, Q6, P6	P12, P6 Q12, Q6	12(1,0), 19(0,25)
13 (6-13)	P6, P13, P6, Q13	P13, Q13, Q6, P6	P13, P6 Q6, Q13	13(1,0)

TABELA 7.3.3.1 (continuação)
 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE ERROS TOPOLÓGICOS DE EXCLUSÃO SIMPLES
 NO SISTEMA IEEE DE 14 BARRAS COM 122 MEDIDAS <PLANO DE MEDIÇÃO COMPLETO>

ELEMENTO EXCLUÍDO	MEDIDAS RELACIONADAS	MEDIDAS SENSÍVEIS SSU _{i-j}	MEDIDAS SUSPEITAS SPT	ELEMENTOS SUSPEITOS (e_{i-j})
15 (7-9)	P7, P9, Q7, Q9	Q7, P7, Q9, P9	P7, P9, Q7, Q9	8(0,125), 9(0,125) 15(1,0)
16 (9-10)	P9, P10, Q9, Q10	Q10, P10, Q9, P9	P10, Q10, P9, Q9	9(0,125), 11(0,125) 16(1,0), 18(0,25)
17 (9-14)	P9, P14, Q9, Q14	Q14, P14, Q9, P9	P14, P9, Q14, Q9	9(0,25), 17(1,0), 20(0,25)
18 (10-11)	P10, P11 Q10, Q11	Q11, P11 Q10, P10	P11, P10	11(0,125), 18(0,5)
19 (12-13)	P12, P13 Q12, Q13	Q12, P12 Q13, P13	P12, P13	12(0,125), 19(0,5)
20 (13-14)	P13, P14 Q13, Q14	Q14, P14 Q13, P13	P14, P13 Q14, Q13	17(0,25), 20(1,0)

7.3.4 Erros Topológicos de Exclusão Simples

Sistema IEEE de 30 barras com 92 medidas

Estas simulações foram feitas utilizando-se o plano de medição proposto por Wu e Liu [22] (ver figura 7.3.4.1).

A tabela 7.3.4.1 apresenta a relação de medidas e conjuntos críticos deste sistema e na tabela 7.3.4.2 são apresentados resultados das simulações.

TABELA 7.3.4.1

RELAÇÃO DE MEDIDAS E CONJUNTOS CRÍTICOS DO SISTEMA IEEE DE 30 BARRAS COM 92 MEDIDAS

	MEDIDAS DE POTÊNCIA ATIVA	MEDIDAS DE POTÊNCIA REATIVA
MEDIDAS CRÍTICAS	P11, P26, T6-9, T13-12 T24-25, T27-28 T27-29, T27-30	Q26 U24-25, U27-28 U27-29, U27-30
CONJUNTOS CRÍTICOS	P5, T6-7 P14, T12-14 P21, T10-21 T4-12, T6-10 T6-8, T28-8 T15-23, T24-22, T24-23	Q5, U6-7 Q11, U6-9, U11 Q14, U12-14 Q21, U10-21 U13-12, U13 U15-23, U24-22, U24-23

O elevado número de medidas e conjuntos críticos demonstra a baixa redundância desde plano de medição, o que implica em um grande número de elementos irrelevantes (elementos 6, 7, 8, 10, 11, 13, 14, 15,

16, 21, 24, 28, 33, 34, 35 e 41). Além disso, como o erro topológico se manifesta pelo efeito acumulado nos resíduos das medidas relacionadas aos elementos mal configurados, a baixa redundância de medidas também faz com que alguns elementos mal configurados não sejam detectados mesmo havendo medidas relacionadas aos mesmos, como ocorre com os elementos 9, 18, 19, 20, 23, 26, 27, 29, 30, 31 e 32. Contudo, nas simulações da exclusão dos elementos 1, 3, 4 e 5 os erros foram detectados e localizados satisfatoriamente.

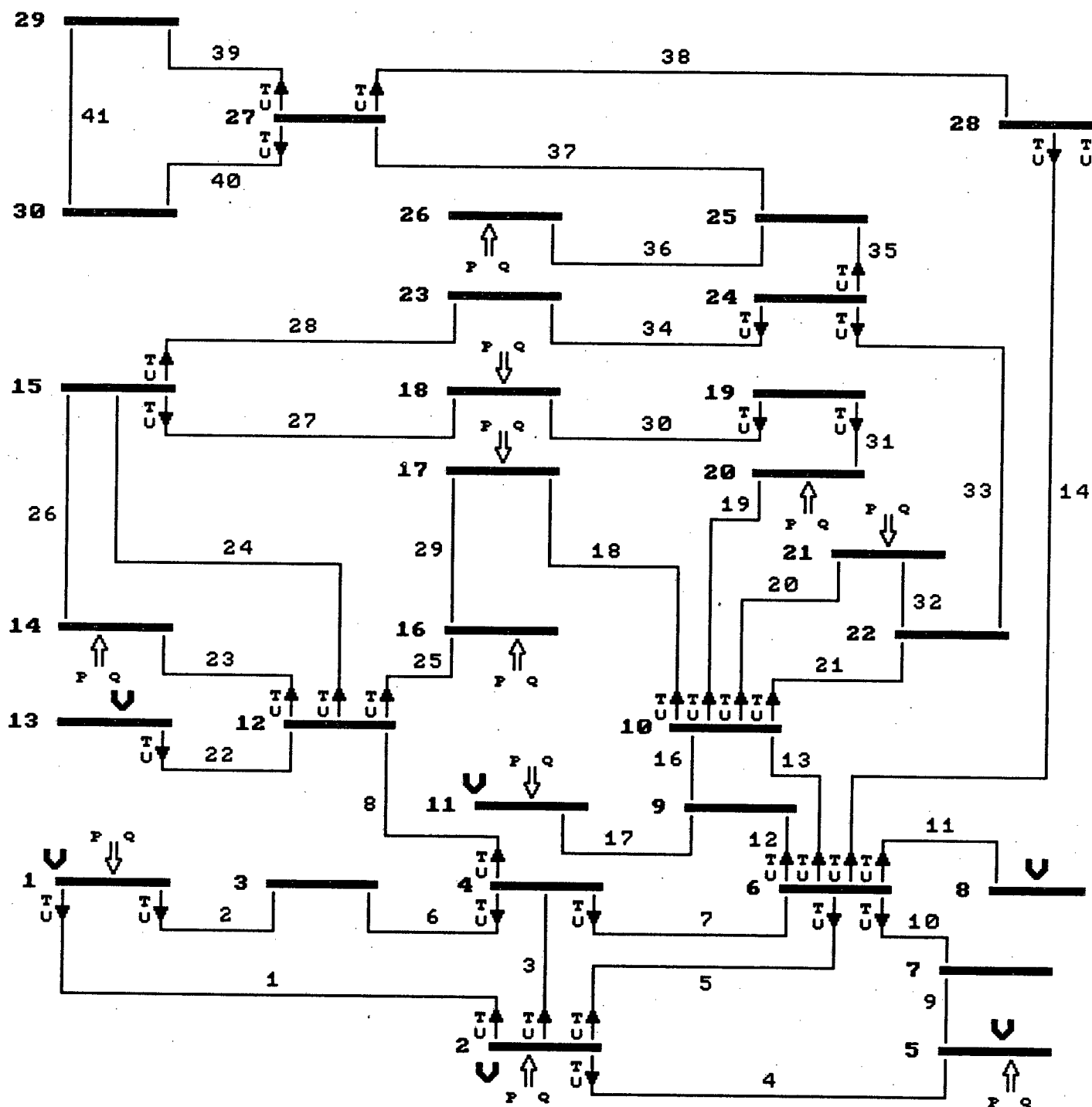


FIGURA 7.3.4.1

Sistema IEEE de 30 barras com plano de medição de 92 medidas

RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE ERROS TOPOLÓGICOS DE EXCLUSÃO SIMPLES
NO SISTEMA IEEE DE 30 BARRAS COM 92 MEDIDAS

ELEMENTO EXCLUÍDO	MEDIDAS RELACIONADAS	MEDIDAS SENSÍVEIS SSV _{i-j}	MEDIDAS SUSPEITAS SPT	MEDIDAS CRÍTICAS	ELEMENTOS SUSPEITOS (e _{i-j})
1 (1-2)	P1, P2, Q1, Q2	Q1, U1-3 Q2, P2	P2, T1-3 T6-7, P5 Q2, Q1	P1, T2-5 Q5, U6-7	1(0,75), 4(0,33) 10(0,5), 35(0,5) 36(0,5), 38(0,5) 39(0,5), 40(0,5)
2 (1-3)	P1, Q1	Q1, U1-2	P1	T4-3, U4-3	-
3 (2-4)	P2, Q2	Q2, P2	P2	-	3(0,5)
4 (2-5)	P2, P5, Q2, Q5	Q2, P2 T6-7, U6-7	P2	-	4(0,25)
5 (2-6)	P2, Q2	Q2, P2	P2	-	5(0,5)
6 (3-4)	IRRELEVANTE	-	-	-	-
7 (4-6)	IRRELEVANTE	-	-	-	-
8 (4-12)	IRRELEVANTE	-	-	-	-
9 (5-7)	P5, Q5	Q5, P5	-	T6-7, U6-7	-
10 (6-7)	IRRELEVANTE	-	-	-	-
11 (6-8)	IRRELEVANTE	-	-	-	-
13 (6-10)	IRRELEVANTE	-	-	-	-
14 (6-28)	IRRELEVANTE	-	-	-	-

TABELA 7.3.4.2 (continuação)
 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE ERROS TOPOLÓGICOS DE EXCLUSÃO SIMPLES
 NO SISTEMA IEEE DE 30 BARRAS COM 92 MEDIDAS

ELEMENTO EXCLUÍDO	MEDIDAS RELACIONADAS	MEDIDAS SENSÍVEIS SSV _{i-j}	MEDIDAS SUSPEITAS SPT	MEDIDAS CRÍTICAS	ELEMENTOS SUSPEITOS (e _{i-j})
15 (8-28)	IRRELEVANTE	-	-	-	-
16 (9-10)	IRRELEVANTE	-	-	-	-
18 (10-17)	P17, Q17	Q17, P17	-	-	-
19 (10-20)	P20, Q20	T19-20 U19-20	-	-	-
20 (10-21)	P21, Q21	T1-2, T2-1	-	-	-
21 (10-22)	IRRELEVANTE	-	-	-	-
23 (12-14)	P14, Q14	T1-2, T2-1	-	-	-
24 (12-15)	IRRELEVANTE	-	-	-	-
25 (12-16)	P16, Q16	Q16, Q17	-	-	-
26 (14-15)	P14, Q14	P14, Q14	-	-	-
27 (15-18)	P18, Q18	T19-18, Q18	-	-	-
28 (15-23)	IRRELEVANTE	-	-	T34-233 U34-233 U34-233	-
29 (6-28)	P16, P17 Q16, Q17	Q16, P16 U12-16, Q17	-	-	-

TABELA 7.3.4.2 (continuação)
 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE ERROS TOPOLÓGICOS DE EXCLUSÃO SIMPLES
 NO SISTEMA IEEE DE 30 BARRAS COM 92 MEDIDAS

ELEMENTO EXCLUÍDO	MEDIDAS RELACIONADAS	MEDIDAS SENSÍVEIS SSV _{i-j}	MEDIDAS SUSPEITAS SPT	MEDIDAS CRÍTICAS	ELEMENTOS SUSPEITOS (e _{i-j})
30 (18-19)	P18, Q18	P18, Q18	-	-	-
31 (19-20)	P20, Q20	Q20, U10-20	-	-	-
32 (21-22)	P21, Q21	Q21, U10-21	-	-	-
33 (22-24)	IRRELEVANTE	-	-	T15-33 U124-33 U24-33	-
34 (23-24)	IRRELEVANTE	-	-	T15-33 U124-33 U24-33	-
35 (25-27)	IRRELEVANTE	-	-	-	-
41 (29-30)	IRRELEVANTE	-	-	-	-

7.3.5 Erros Topológicos de Exclusão Simples

Sistema IEEE de 30 barras com 143 medidas

Nesta subsecção são apresentados os resultados das simulações obtidas pela exclusão dos elementos do sistema IEEE de 30 barras com 143 medidas, ou seja, um plano de medição bem maior que aquele utilizado na secção anterior. Este plano de medição, apresentado na figura 7.3.5.1, consiste nas medidas de injeção de potência e do módulo da tensão em todas as barras e nas medidas de fluxo de potência em todos os elementos da rede.

Pela tabela 7.3.5.1 nota-se que na grande maioria das simulações os elementos mal configurados foram localizados corretamente. Analizando os fluxos de potência nos elementos da rede apresentados no Apêndice III, verifica-se também que os elementos cuja exclusão não foi detectada (elementos 15, 26, 29, 30, 32, 34, 35, 37, 39 e 41) são os elementos cujos fluxos de potência são baixos, ou seja, o efeito da má configuração destes elementos é, em termos numéricos, pequeno em relação ao limiar adotado para a detecção de erros.

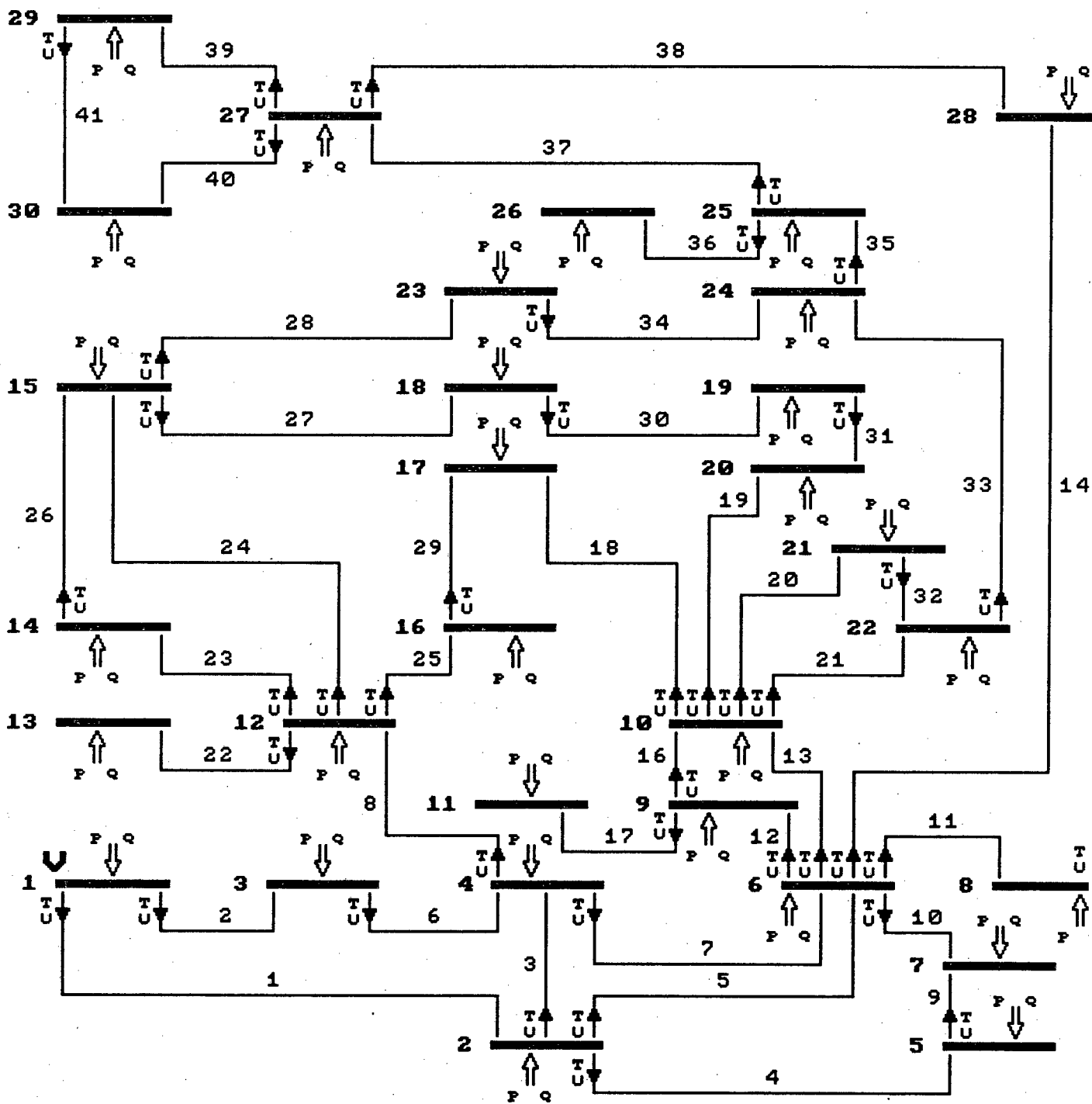


FIGURA 7.3.5.1

Sistema IEEE de 30 barras com plano de medição de 143 medidas

TABELA 7.3.5.1
 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE ERROS TOPOLÓGICOS DE EXCLUSÃO SIMPLES
 NO SISTEMA IEEE DE 30 BARRAS COM 143 MEDIDAS

ELEMENTO EXCLUÍDO	MEDIDAS RELACIONADAS	MEDIDAS SENSÍVEIS SSV _{i-j}	MEDIDAS SUSPEITAS SPT	ELEMENTOS SUSPEITOS (e_{i-j})
1 (1-2)	P1,P2,Q1,Q2	Q1,U1-3,Q2,P2	P2,P1,Q2,Q1	1(0,75),2(0,17)
2 (1-3)	P1,P3,Q1,Q3	Q3,Q1,P3,U1-2	P3,P1	2(0,25)
3 (2-4)	P2,P4,Q2,Q4	Q4,Q2,P4,U4-6	P4,P2	3(0,25)
4 (2-5)	P2,P5,Q2,Q5	Q5,P5,Q2,U5-7	P5,P2	4(0,25)
5 (2-6)	P2,P6,Q2,Q6	Q2,Q6,P2,P6	P6,P2	5(0,5)
6 (3-4)	P3,P4,Q3,Q4	Q3,P3,Q4,U1-3	P3,P4	2(0,17),6(0,25)
7 (4-6)	P4,P6,Q4,Q6	Q4,P4,Q6,P6	P4,P6	7(0,5)
8 (4-12)	P4,P12,Q4,Q12	Q4,Q12,P12,P4	P12,P4,Q12	8(0,75),22(0,17)
9 (5-7)	P5,P7,Q5,Q7	Q5,Q7,P7,P5	Q7,Q5	4(0,17),9(0,5),10(0,17)
10 (6-7)	P6,P7,Q6,Q7	Q7,P7,T5-7 U5-7	P7,P6	9(0,17),10(0,25)
11 (6-8)	P6,P8,Q6,Q8	Q8,P8,U8-28 T8-28	P8,P6	11(0,25)
12 (6-9)	P6,P9,Q6,Q9	Q9,P9,U9-10 T9-10	P9,P6,Q6	12(0,5),17(0,17)
13 (6-10)	P6,P10,P6,Q10	Q10,P10,Q6,P6	P10,P6	13(0,5)

TABELA 7.3.5.1 (continuação)
 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE ERROS TOPOLÓGICOS DE EXCLUSÃO SIMPLES
 NO SISTEMA IEEE DE 30 BARRAS COM 143 MEDIDAS

ELEMENTO EXCLUÍDO	MEDIDAS RELACIONADAS	MEDIDAS SENSÍVEIS SSV i-j	MEDIDAS SUSPEITAS SPT	ELEMENTOS SUSPEITOS (e_{i-j})
14 (6-28)	P6, P28 Q6, Q28	Q28, P28 T8-28, U8-28	P28, P6	14(0,25)
15 (8-28)	P8, P28 Q8, Q28	Q8, P8 U6-8, T6-8	-	-
16 (9-10)	P9, P10 Q9, Q10	P9, Q9 U6-9, Q10	P9, P10 Q9, Q10	12(0,17), 13(0,17) 16(0,75), 17(0,17)
18 (10-17)	P10, P17 Q10, Q17	Q17, P17 Q10, P10	P17	18(0,25), 29(0,17)
19 (10-20)	P10, P20 Q10, Q20	Q20, P20 Q10, P10	P20	19(0,25), 31(0,17)
20 (10-21)	P10, P21 Q10, Q21	Q21, P21 T21-22 U21-22	P21	20(0,25)
21 (10-22)	P10, P22 Q10, Q22	P22, Q22 T21-22 U21-22	P22	21(0,25)
23 (12-14)	P12, P14 Q12, Q14	Q14, P14 T14-15 U14-15	P14	23(0,25)
24 (12-15)	P12, P15 Q12, Q15	P15, Q15 P12, Q12	P15, P12	24(0,5)
25 (12-16)	P12, P16 Q12, Q16	Q16, P16 Q12, P12	P16	25(0,25)
26 (14-15)	P14, P15 Q14, Q15	Q14, P14 U12-14 T12-14	-	-
27 (15-18)	P15, P18 Q15, Q18	Q18, P18 Q15, P15	P18	27(0,25)
28 (15-23)	P15, P23 Q15, Q23	Q23, P23 Q15, P15	P23	28(0,25)

TABELA 7.3.5.1 (continuação)
 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE ERROS TOPOLÓGICOS DE EXCLUSÃO SIMPLES
 NO SISTEMA IEEE DE 30 BARRAS COM 143 MEDIDAS

ELEMENTO EXCLUÍDO	MEDIDAS RELACIONADAS	MEDIDAS SENSÍVEIS SSU $i-j$	MEDIDAS SUSPEITAS SPT	ELEMENTOS SUSPEITOS (e_{i-j})
29 (16-17)	P16, P17 Q16, Q17	Q16, P16 Q17, P17	-	-
30 (18-19)	P18, P19 Q18, Q19	Q19, P19 P18, Q18	-	-
31 (19-20)	P19, P20 Q19, Q20	Q19, P19 Q20, P20	P20, P19	19(0,17), 30(0,17) 31(0,5)
32 (21-22)	P21, P22 Q21, Q22	Q21, P21 Q22, P22 Q10-21 T10-21	-	-
33 (22-24)	P22, P24 Q22, Q24	Q22, P22 Q24, P24	P24, P22	33(0,5)
34 (23-24)	P23, P24 Q23, Q24	Q23, P23 Q24, P24	-	-
35 (24-25)	P24, P25 Q24, Q25	Q24, P24 Q25, P25	-	-
37 (25-27)	P25, P27 Q25, Q27	Q25, P25 Q27, P27	-	-
38 (27-28)	P27, P28 Q27, Q28	Q28, P28 Q27, P27	P28, P27	37(0,17), 38(0,5)
39 (27-29)	P27, P29 Q27, Q29	Q29, P29 Q29, P30 T29-30	T27-30	-
40 (27-30)	P27, P30 Q27, Q30	Q30, P30 Q29-30 T29-30	P30	40(0,25), 41(0,17)
41 (29-30)	P29, P30 Q29, Q30	P30, Q30 P29 U27-30	-	-

7.3.6 Erros Topológicos de Inclusão Simples

Sistema IEEE de 14 barras com 122 medidas

Para ilustrar o comportamento do método proposto para o processamento de erros topológicos frente a erros de inclusão simples foram simuladas as inclusões dos elementos 5-8 e 11-14 no sistema IEEE de 14 barras com o plano de medição contendo 122 medidas (figura 7.3.6.1).

Em ambos os casos vários elementos foram considerados suspeitos. Contudo, os elementos indevidamente incluídos no modelo (5-8 e 11-14) possuem os maiores índices e_{1-j} , como mostra a tabela 7.3.6.1.

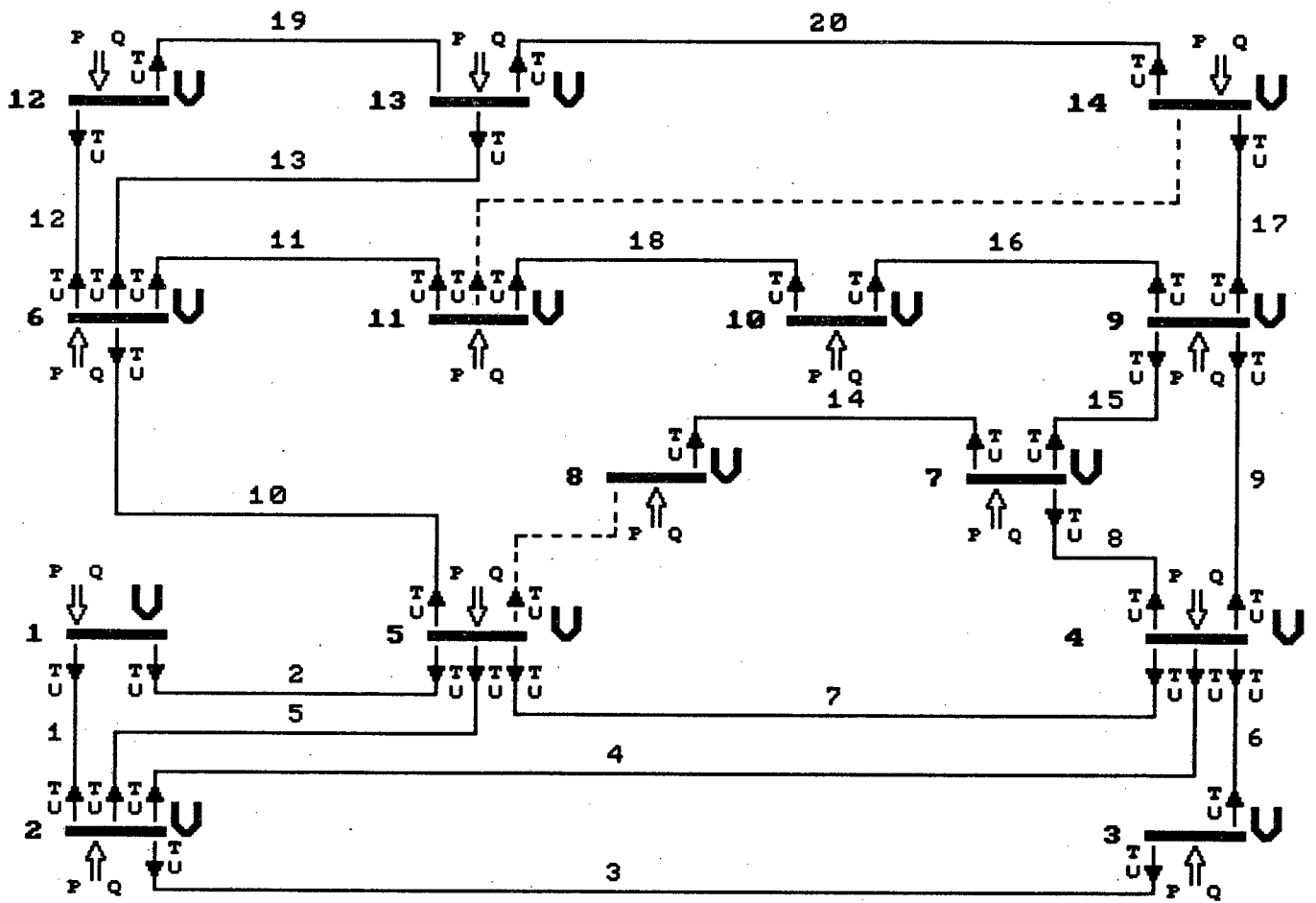


FIGURA 7.3.6.1

Sistema IEEE de 14 barras com plano de medição de 122 medidas
com elementos incluídos

TABELA 7.3.6.1
**RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE ERROS TOPOLÓGICOS DE INCLUSÃO SIMPLES
 NO SISTEMA IEEE DE 14 BARRAS COM 122 MEDIDAS**

ELEMENTO INCLUÍDO	MEDIDAS RELACIONADAS	MEDIDAS SENSÍVEIS SSV _{i-j}	MEDIDAS SUSPEITAS SPT	ELEMENTOS SUSPEITOS (e _{i-j})
5-8	T5-8, U5-8 P5, Q5 P8, Q8	U8-7, U5-8 U7-8, T5-8 U4-7, U7-4	T5-8, U5-8 U8-7, Q8 Q5, P5, P8	4-5(0,125) 4-7(0,25) 5-8(0,5) 7-8(0,375)
11-14	T11-14, U11-14 P11, Q11 P14, Q14	T11-14 U11-14 T9-14 T14-9 U9-14 U14-9	T9-14, T14-9 T13-14, T14-13 U11-14, P9, U9-14 U14, U14-9 U11-10, U10-11 U6-11, U13-14 U9-10, U11-6 U10-9, U14-13 P14, P13	6-11(0,375) 6-13(0,125) 9-10(0,625) 9-14(0,625) 10-11(0,75) 11-14(0,833) 13-14(0,625)

7.3.7 Erros Topológicos de Exclusão Múltiplos

Erros topológicos múltiplos de exclusão foram simulados nos sistema IEEE de 14 barras com 122 medidas (figura 7.3.3.1) e de 30 barras com 143 medidas (figura 7.3.5.1). Em ambos os sistemas foram simulados dois tipos de situações: exclusão de dois elementos distantes e exclusão de dois elementos conectados a uma mesma barra.

No sistema de 14 barras as simulações foram feitas com a exclusão dos elementos 2 (1-5) e 20 (13-14), para a simulação da má configuração de elementos distantes e dos elementos 5 (2-5) e 7 (4-5) para o caso de elementos com uma barra em comum. Os resultados destes casos são apresentados na tabela 7.3.7.1.

Já no caso do sistema de 30 barras, foram utilizados os elementos 4 (2-5) e 31 (19-20) para a exclusão de elementos distantes e 7 (4-6) e 12 (6-9) no caso de elementos conectados a uma mesma barra. A tabela 7.3.7.2 apresenta os resultados destas simulações.

Os resultados destas simulações mostram que os elementos excluídos foram declarados como suspeitos em todos os casos simulados. Além disso, os índices e_{1-j} destes elementos foram satisfatórios.

TABELA 7.3.7.1
**RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE ERROS TOPOLÓGICOS DE EXCLUSÃO MÚLTIPLOS
 NO SISTEMA IEEE DE 14 BARRAS COM 122 MEDIDAS**

ELEMENTOS EXCLUÍDOS	MEDIDAS RELACIONADAS	MEDIDAS SENSÍVEIS SSU _{i-j}	MEDIDAS SUSPEITAS SPT	ELEMENTOS SUSPEITOS (e_{i-j})
2(1-5)	P1, P5 Q1, Q5	Q1, Q5 P5, U1-2	P5, P1 P14, Q1	1(0, 125) 2(0, 5)
20(13-14)	P13, P14 Q13, Q14	Q14, P14 Q13, P13	P13, Q13 Q14	17(0, 25) 20(1, 0)
5(2-5)	P2, P5 Q2, Q5	Q5, P5 Q2, P2	P4, P5, P2 Q5, Q4, Q2	5(1, 0) 7(1, 0) 14(0, 25)
7(4-5)	P4, P5 Q4, Q5	Q5, P5 Q4, P4		

TABELA 7.3.7.2
 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE ERROS TOPOLÓGICOS DE EXCLUSÃO MÚLTIPLOS
 NO SISTEMA IEEE DE 30 BARRAS COM 143 MEDIDAS

ELEMENTOS EXCLUÍDOS	MEDIDAS RELACIONADAS	MEDIDAS SENSÍVEIS SSV _{i-j}	MEDIDAS SUSPEITAS SPT	ELEMENTOS SUSPEITOS (e_{i-j})
4<2-5>	P2, P5 Q2, Q5	Q5, P5 Q2, U5-7	P5, P2 P19, P20	4<0,25> 19<0,17> 30<0,17> 31<0,5>
31<19-20>	P19, P20 Q19, Q20	Q19, P19 Q20, P20		
7<4-6>	P4, P6 Q4, Q6	Q4, Q6 P4, P6	P4, P9 P6, Q9	7<0,5> 12<0,25> 17<0,17>
12<6-9>	P6, P9 Q6, Q9	Q9, P9 U9-10 T9-10		

7.3.8 Erros Topológicos de Exclusão Múltiplos - "Bus Split"

Considerando que, através de operações de chaveamento, a barra 9 do sistema IEEE de 14 barras possa ser dividida em duas, foi simulado um seccionamento de barra ("Bus Split") com a exclusão dos elementos 4-9 e 9-14 e a inclusão dos elementos 4-15 e 14-15, conforme está indicado na figura 7.3.8.1.

Pelos resultados apresentados na tabela 7.3.8.1 verifica-se que a má configuração dos elementos foi detectada e localizada.

Os índices $e_{4-9} = 1,0$ e $e_{9-14} = 1,0$ garantem também a localização da inclusão dos elementos 4-15 e 14-15 já que, na realidade, os elementos (4-9 e 4-15) e (9-14 e 14-15) são o mesmo dispositivo físico e a mudança de "status" dos elementos 4-9 e 9-14 implica na troca do "status" dos elementos 4-15 e 14-15.

Na tabela 7.3.8.2 são apresentados os resultados supondo a troca de "status" dos elementos 4-9 e 4-15 e, na tabela 7.3.8.3 são apresentados os resultados supondo que a má configuração dos elementos 9-14 e 14-15 foi corrigida, permanecendo o erro de configuração nos outros elementos.

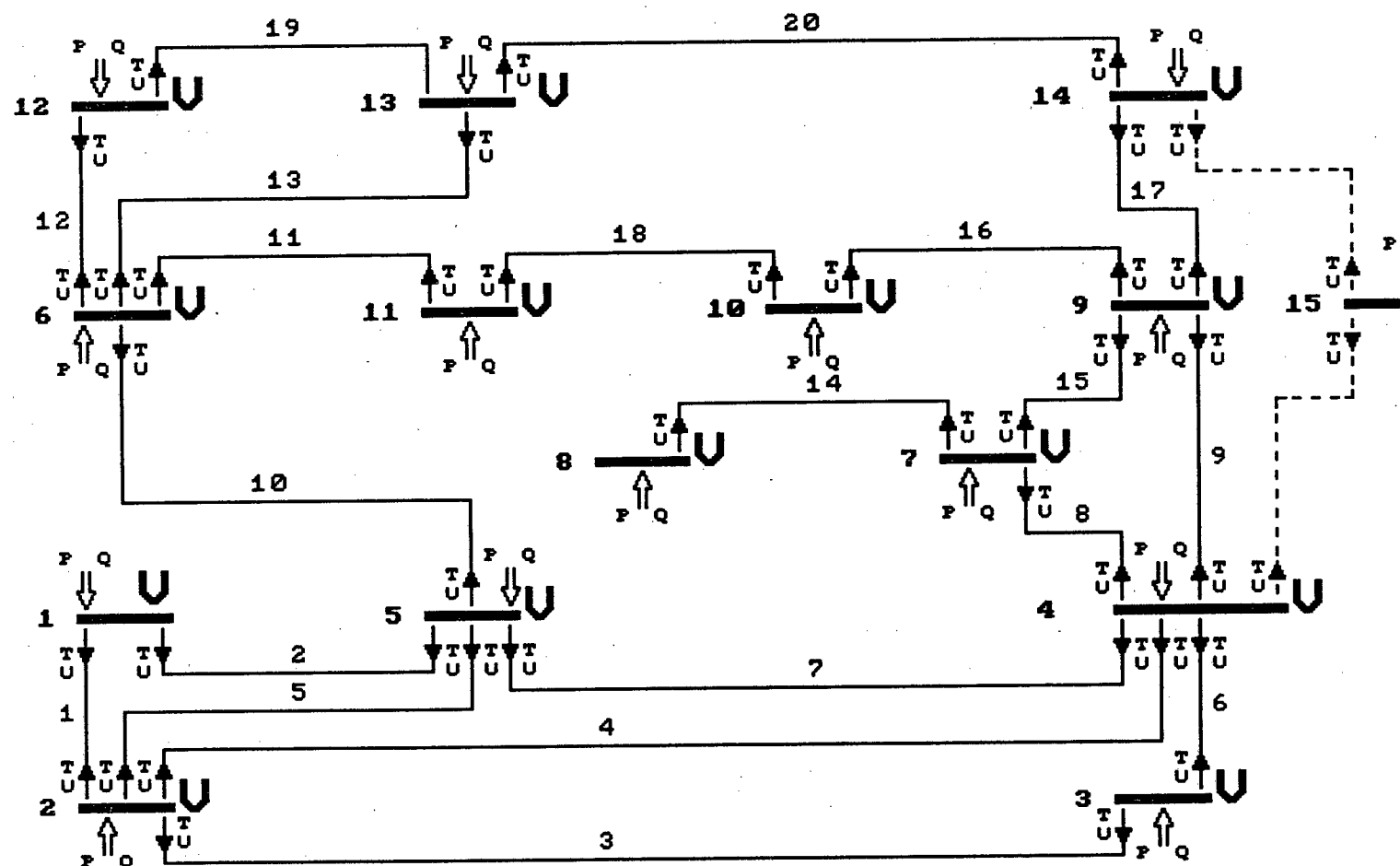


FIGURA 7.3.8.1

Sistema IEEE de 14 barras com plano de medição de 122 medidas
com indicação do "bus split" na barra 9

TABELA 7.3.8.1
 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE ERRO TOPOLÓGICO DO TIPO "BUS SPLIT"
 NO SISTEMA IEEE DE 14 BARRAS COM 122 MEDIDAS

ELEMENTO	MEDIDAS RELACIONADAS	MEDIDAS SENSÍVEIS SSV i-j	MEDIDAS SUSPEITAS SPT	ELEMENTOS SUSPEITOS (e_{i-j})	
INCLUSÃO	4-15	T4-15, T15-4 U4-15, U15-4 P4, P15 Q4, Q15	U15-4, T4-15 T15-4, T13-14 T15-14, T14-15 T14-13, U4-15	P14 T14-15 T15-14 Q14 P15	4-9(1,0) 4-15(0,75) 7-8(0,25) 9-14(1,0) 13-14(0,5) 14-15(0,5)
	14-15	T14-15, T15-14 U14-15, U15-14 P14, P15 Q14, Q15	U4-15, U15-4 U15-14, U14-15 U13-14, U14-13 T13-14, T14-13	U4-15 P9 U14-15 U15-4 U15-14	
EXCLUSÃO	4-9	P4, P9 Q4, Q9	Q9, P9 Q4, P4	Q9 T4-15	4-9(1,0) 4-15(0,75) 7-8(0,25) 9-14(1,0) 13-14(0,5) 14-15(0,5)
	9-14	P9, P14 Q9, Q14	Q14, P14 Q9, P9	Q4 T15-4 P4	

TABELA 7.3.8.2
 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE ERRO TOPOLÓGICO DO TIPO "BUS SPLIT"
 NO SISTEMA IEEE DE 14 BARRAS COM 122 MEDIDAS

ELEMENTO	MEDIDAS RELACIONADAS	MEDIDAS SENSÍVEIS SSV _{i-j}	MEDIDAS SUSPEITAS SPT	ELEMENTOS SUSPEITOS (e _{i-j})
INCLUSÃO	14-15	T14-15, T15-14 U14-15, U15-14 P14, P15 Q14, Q15	U15-14, Q15 U13-14, U14-13 T15-14, P15 U13-6, T13-14	4-9(0,25) 9-14(1,0) 13-14(0,25) 14-15(0,25)
EXCLUSÃO	9-14	P9, P14 Q9, Q14	Q14, P14 Q9, P9	

TABELA 7.3.8.3
 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE ERRO TOPOLÓGICO DO TIPO "BUS SPLIT"
 NO SISTEMA IEEE DE 14 BARRAS COM 122 MEDIDAS

ELEMENTO	MEDIDAS RELACIONADAS	MEDIDAS SENSÍVEIS SSV _{i-j}	MEDIDAS SUSPEITAS SPT	ELEMENTOS SUSPEITOS (e_{i-j})
INCLUSÃO	4-15	T4-15, T15-4 U4-15, U15-4 P4, P15 Q4, Q15	U15-4, Q15 U4-15, U5-6 T7-4, U4-7 U6-5, Q6	4-9(0,25) 14-15(0,125)
EXCLUSÃO	4-9	P4, P9 Q4, Q9	P9 Q15 U15 P15	

7.4 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada a estratégia computacional utilizada para simulação de erros topológicos e teste do método proposto capítulo 6 .

São apresentados também os resultados obtidos nos testes realizados utilizando os sistemas IEEE de 14 e de 30 barras com diferentes planos de medição.

Na tentativa de simular as diversas situações que podem ocorrer em um sistema real foram simulados vários tipos de erros topológicos como: erros de exclusão simples, erros de inclusão simples, erros de exclusão múltipla e um seccionamento de barra ("bus split"), que consiste em um erro em ocorrem inclusões e exclusões múltiplas.

Os resultados foram satisfatórios na grande maioria dos casos simulados e foi verificado que o desempenho do método é bem melhor quando o plano de medição possui alta redundância.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

8.1 Conclusões

Este trabalho introduz o tratamento da EESP sob um ponto de vista geométrico. Quando analisado sob esta ótica, o problema pode ser interpretado como a obtenção da projeção do vetor que contém os valores das medidas sobre o espaço gerado pelas colunas da matriz Jacobiana. Além disso, a projeção do vetor de medidas sobre o complemento ortogonal do espaço coluna da matriz Jacobiana fornece o vetor de resíduos.

Levando em conta esta interpretação, é fácil de se verificar que erros grosseiros em medidas, cujos efeitos se manifestam obviamente sobre o vetor de medidas, e erros de topologia, que afetam a matriz Jacobiana, têm um efeito equivalente sobre os resíduos de estimação, o que torna o vetor de resíduos um indicador da existência de ambos os erros.

As condições para a detectabilidade de erros de topologia são enunciadas com relativa simplicidade quando se utiliza os conceitos de medidas críticas. Esta abordagem é considerada outra contribuição deste trabalho. Comprova-se também, a partir dos resultados obtidos, que o plano de medição é preponderante para a detectabilidade de erros de topologia nos elementos da rede elétrica.

No presente trabalho também é proposto um método para o processamento de erros de topologia que se utiliza de uma relação de

sensibilidade entre os resíduos e os fluxos de potência nos elementos da rede. Embora o método faça uso da matriz de sensibilidade dos resíduos com respeito aos fluxos nos elementos da rede, não é necessário que esta matriz seja re-calculada a cada execução do estimador de estados. Tendo em vista que a variação das condições de operação dos sistemas de potência é normalmente lenta e que a informação desejada é qualitativa (quais medidas são mais afetadas pelo erro de topologia, e não quanto as medidas são afetadas), a matriz de sensibilidade pode ser mantida constante durante várias execuções sucessivas do estimador. Há necessidade de recalculá-la sempre que ocorrer variações significativas na topologia da rede elétrica ou após grande variação no ponto de operação. Além destes casos, a matriz de sensibilidade deverá ser também atualizada periodicamente, em função do deslocamento normal do ponto de operação. É portanto possível realizar estes cálculos e determinar os conjuntos de medidas sensíveis em ambiente "off-line".

Diferentes sistemas-teste foram utilizados para a simulação de erros de topologia com o objetivo de analisar o desempenho do método proposto no Capítulo 6. Pelos resultados obtidos, verificou-se que, nos sistemas que possuem um bom plano de medição, os elementos mal configurados foram localizados com uma melhor precisão do que nos sistemas com baixa redundância de medidas. Não obstante, em todos os sistemas utilizados a maioria dos erros topológicos simulados foram localizados.

Portanto, é importante ressaltar a importância do plano de medição no desempenho do método abordado neste trabalho. Os resultados obtidos indicam claramente que um nível adequado de redundância no plano de medição é fundamental para que a EESP e os métodos aqui descritos para o processamento de erros grosseiros e topológicos alcancem os seus

objetivos de fornecer uma base de dados confiável para a análise de segurança e demais funções necessárias à operação em tempo real de um sistema de potência.

8.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

O método proposto no Capítulo 6 pode ser aprimorado nos seguintes pontos:

- Como foi verificado na apresentação dos resultados, os conjuntos críticos podem causar dificuldades para a localização dos elementos mal configurados. A elaboração de um algoritmo que utilize a informação dos conjuntos críticos durante a intersecção dos conjuntos de medidas suspeitas e medidas sensíveis pode melhorar o desempenho do método.

- A equação 6.3.3 utiliza para a localização dos erros de configuração o parâmetro λ . A determinação do λ ideal, tendo por base, por exemplo, métodos de Teoria da Decisão, para cada sistema pode reduzir consideravelmente o risco de uma localização incorreta de elementos mal configurados.

- A teoria para a detectabilidade de erros topológicos, bem como o método proposto no Capítulo 6, são aplicáveis a erros de configuração de elementos transversais (capacitores e reatores "shunt"). Sugere-se que sejam realizados testes sobre o método proposto com o objetivo de verificar o desempenho do método frente à má configuração deste tipo de elementos de uma rede elétrica.

- Existem situações em que a ocorrência simultânea de erros grosseiros e erros topológicos pode vir a prejudicar o método proposto no Capítulo 6. Este problema pode ser contornado através da elaboração

de uma lógica que possa detectar tais situações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Amaral, S. ; Simões Costa A.J.A. (1988) . " Identificação de Erros Grosseiros Múltiplos Via Testes de Hipóteses e Técnicas Ortogonais", Anais do 7º Congresso Brasileiro de Automática : 837-843 .
- [2] Amaral, S. (1987) . " Métodos para Processamento de Erros Grosseiros Múltiplos em Estimadores de Estado Sequenciais-Ortogonais , Tese de Mestrado , UFSC .
- [3] Bonanomi, P. ; Gramberg, G. (1983) . "Power System Data Validation and State Calculation by Network search Techniques" , IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.1 : 238-249 .
- [4] Clements, K.A. ; Davis, P.W. (1988) . "Detection and Identification of Topology Errors in Electric Power Systems" , IEEE Trans. on Power Systems, Vol.3 , No.4 : 1748-1753.
- [5] Clements, K.A. ; Davis, P.W. (1986) . "Multiple Bad Data Detectability and Identifiability : A Geometric Approach" , IEEE Trans. on Power Delivery , Vol. PWRD-1 , No. 3 : 355-360 .
- [6] Freire, L.M. (1989) . "Identificação de Erros de Topologia na Estimação Estática de Estado em Sistemas de Energia Elétrica" , Tese de Mestrado , UNICAMP .

- [7] Garcia, A.V. ; Monticelli, A.J. (1982) . "Análise de Sensibilidade Aplicada ao processamento de Erros Grosseiros na Estimação de Estados em Sistemas de Energia Elétrica" , Anais do 4º Congresso Brasileiro de Automática : 462-466 .
- [8] Handschin, E. ; Schweppe, F.C. ; Kohlas, J.; Fiechter, A. (1975) . "Bad Data Analysis for Power system State Estimation" , IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems , Vol.PAS-94 , No.2 : 329-337 .
- [9] Krumpholz, G.R. ; Clements, K.A. ; Davis, P.W. (1980). "Power System Observability: A Practical Algorithm Using Network Topology", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-99, No.4: 1534-1542.
- [10] Lugtu , R.L. ; Hackett , D.F. ; Liu , K.C. ; Might, D. D. (1980) . "Power System State Estimation : Detection of Topology Errors" , IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems , Vol.PAS-99 ,No.6 : 2406-2412 .
- [11] Monticelli, A. ; Wu, F.F. (1985). "Network Observability: Theory" , IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS - 104 , No.5 : 1042-1048 .
- [12] Piazza , T.S. (1989). "Aplicação de Métodos Combinatórios a Estimção de Estados de Sistemas de Potência: Determinação de Medidas e Conjuntos Críticos e Alocação de Pseudomedidas" , Tese de Mestrado , UFSC .
- [13] Schweppe , F.C. ; Handschin , E.J. (1974). "Static State Estimation in Electric Power Systems" , Proceedings of the IEEE , Vol.62 , No.7 : 972-982 .

- [14] Schweppe , F.C. ; Wildes , J. (1970). "Power System Static-State Estimation. Part I : Exact Model" , IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems , Vol.PAS-89 , No.1 : 120-125 .
- [15] Schweppe , F.C. ; Douglas B.R. (1970) . "Power System Static-State Estimation. Part II: Approximate Model", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-89 , No.1 : 125-130 .
- [16] Simões Costa , A.J.A. ; Quintana , V.H. (1981). "A Robust Numerical Technique for Power System State Estimation", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-100, No.2 : 691-698.
- [17] Simões Costa , A.J.A. ; Mandel , A. (1987). "A Abordagem Topológica Para Observabilidade de Sistemas de Potência : Teoria e um Algoritmo " , SBA : Controle e Automação , Vol.1 , No.1 : 59-71 .
- [18] Simões Costa , A.J.A. (1988) . "Determinação de Conjuntos Críticos de Medidas na Estimação de Estados em Sistemas de Potência" , Anais do 7º Congresso Brasileiro de Automática : 830-836.
- [19] Singh , N. ; Glavitsch , H. (1990) . "Detection and Identification of Topological Errors in Online Power System Analysis" , IEEE Winter meeting 1990.
- [20] Stewart , G.W. (1973). "Introduction to Matrix Computations", Academic Press, capítulo 5 : 217-230.

- [21] Stewart , G.W. (1977) . "On the Perturbation of Pseudo-inverses , Projections and Linear Least Squares Problems" , Siam Review , Vol.19 , No.4 : 634-662 .
- [22] Wu , F.F. ; Liu , W.H. (1989) . "Detection of Topology Errors by State Estimation" , IEEE Trans. on Power Systems , Vol.4 , No.1 : 176-183 .
- [23] Hoffman, H.; Kunze, R. (1979). "Algebra Linear", LTC Editora.
- [24] Milli, L. ; Van Cutsem, T. ; Ribbens-Pavela, M. (1984). "Hypothesis Testing Identification - A new method for Bad Data Anaysis in Power System State Estimation" , IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-103, No.11.
- [25] Noble, B. ; Daniel, J. W. (1977). "Applied Linear Algebra", second edition, Prentice-Hall, pag. 444.

APÊNDICE I

REDUÇÃO DO PROBLEMA DA EESP À FORMA NÃO-PONDERADA

A redução do modelo da EESP a uma forma não-ponderada é utilizada no presente trabalho de acordo com o que está apresentado na referência [16].

A matriz de covariância dos erros nas medidas, R , é não-singular e definida positiva e, na prática, é usualmente considerada diagonal. Portanto, a sua raiz quadrada é obtida de forma trivial, ou seja, tomando a raiz quadrada dos seus elementos.

Considerando que a raiz quadrada de R é $R^{1/2}$, então

$$E \{ \underline{\eta} \underline{\eta}^T \} = R \triangleq R^{1/2} R^{T/2} \quad (I.1)$$

e, portanto,

$$E \{ (R^{-1/2} \underline{\eta}) (R^{-1/2} \underline{\eta})^T \} = I \quad (I.2)$$

De acordo com a equação (I.2), o vetor modificado de erros nas medidas $R^{-1/2} \underline{\eta}$ tem covariância unitária.

Pré-multiplicando-se a equação que representa o modelo DC da EESP,

$$\underline{z} = H \underline{x} + \underline{\eta} \quad (I.3)$$

por $R^{-1/2}$, obtém-se o modelo não-ponderado descrito por:

$$\underline{y} = G \underline{x} + \underline{v} \quad (I.4)$$

$$E \{ \underline{v} \underline{v}^T \} = I \quad (I.5)$$

onde

$$\underline{y} \triangleq R^{-1/2} \underline{z} \quad (I.6)$$

$$G \triangleq R^{-1/2} H \quad (I.7)$$

$$\underline{v} \stackrel{\Delta}{=} R^{-1/2} \underline{\eta} \quad (\text{I.8})$$

Desta forma a equação 2.2.13, reescrita abaixo:

$$J(\underline{x}) = (\underline{z} - H \underline{x})^T R^{-1} (\underline{z} - H \underline{x}), \quad (\text{I.9})$$

se transforma em

$$J(\underline{x}) = (\underline{y} - G \underline{x})^T (\underline{y} - G \underline{x}). \quad (\text{I.10})$$

A equação I.10 representa a forma não-ponderada da função a ser minimizada.

Com base nas afirmações feitas na seção 3.2, pode-se concluir que a solução do problema de mínimos quadrados descrito pela equação I.10 é $\hat{\underline{x}}$ tal que:

$$\hat{\underline{x}} = G^+ \underline{y} \quad (\text{I.11})$$

onde
$$G^+ = (G^T G)^{-1} G^T. \quad (\text{I.12})$$

Por outro lado, o problema de mínimos quadrados da equação I.9 tem a mesma solução do problema em I.10. Esta solução é dada pela equação 2.2.14, ou seja,

$$\hat{\underline{x}} = (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} \underline{z} \quad (\text{I.13})$$

o que equivale a

$$\hat{\underline{x}} = H^+ \underline{z}. \quad (\text{I.14})$$

Como visto na seção 3.3, o vetor $\hat{\underline{x}}$ é tal que os vetores de estimativa para as quantidades medidas do modelo original, $\hat{\underline{z}}$, e do modelo não-ponderado, $\hat{\underline{y}}$, são dados por:

$$\hat{\underline{z}} = H \hat{\underline{x}} = P_H \underline{z} \quad (\text{I.15})$$

e
$$\hat{\underline{y}} = G \hat{\underline{x}} = P_G \underline{y}. \quad (\text{I.16})$$

Isto é, $\hat{\underline{z}}$ e $\hat{\underline{y}}$ são as projeções ortogonais sobre os espaços $\text{Im}(H)$ e $\text{Im}(G)$ respectivamente.

Algumas relações interessantes podem ser obtidas das equações I.15 e I.16 tais como:

$$\hat{\underline{y}} = R^{-1/2} \hat{\underline{z}} \quad (\text{I.17})$$

$$e \quad P_G = R^{-1/2} P_H R^{1/2} \quad (I.18)$$

Das relações acima conclui-se que: obter a projeção ortogonal de y sobre o espaço $Im(G)$ é, sob o ponto de vista da solução do problema de mínimos quadrados, equivalente a obter a projeção ortogonal de \underline{z} sobre o espaço $Im(H)$.

A mesma consideração é válida para as partições $\underline{t}_{1-j}^f(\underline{x})$, $\underline{u}_{1-j}^f(\underline{x})$, $\underline{t}_{j-1}^f(\underline{x})$ e $\underline{u}_{j-1}^f(\underline{x})$ do vetor $\underline{f}(\underline{x})$.

As partições da matriz M acima que não foram assinaladas são submatrizes nulas.

As linhas das partições T₁, T₂, U₁ e U₂ possuem o valor 1 na coluna relativo ao fluxo de potência correspondente. As linhas das submatrizes P₁, P₂, Q₁ e Q₂ possuem o valor 1 nas posições relativas aos fluxos cuja soma fornece a injeção de potência desejada.

A equação matricial estendida acima pode ser sensivelmente reduzida quando algumas simplificações são feitas. Considerando que o interesse deste trabalho não se concentra na análise de variações dos fluxos de potência, mas na presença ou não de elementos da rede no sistema configurado, o vetor $\underline{f}(\underline{x})$ pode ser reduzido a uma forma na qual se considera apenas os elementos e não os fluxos de potência.

As simplificações que levam à redução da matriz M consistem em representar indistintamente os fluxos de potência ativa, $\underline{t}_{1-j}(\underline{x})$, e reativa, $\underline{u}_{1-j}(\underline{x})$, por $\underline{f}_{1-j}(\underline{x})$ e em considerar

$$\underline{f}_{1-j}(\underline{x}) = - \underline{f}_{j-1}(\underline{x}) \quad . \quad (II.2)$$

Feitas estas simplificações obtém-se uma nova relação dada por:

$$\Delta \underline{h}(\underline{x}) = M^r \underline{f}^r(\underline{x}) \quad , \quad (II.3)$$

onde M^r é uma matriz $m \times l$ e $\underline{f}^r(\underline{x})$ é um vetor $l \times 1$. A relação dada por II.3 é escrita na sua forma estendida abaixo:

$$\begin{bmatrix} \underline{t}_{1-j}(\underline{x}) \\ \underline{t}_{j-1}(\underline{x}) \\ \underline{u}_{1-j}(\underline{x}) \\ \underline{u}_{j-1}(\underline{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 \\ -T_2 \\ U_1 \\ -U_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{f}_{1-j}(\underline{x}) \end{bmatrix}$$

A matriz M^r é montada de acordo com as seguintes regras:

- Medidas de fluxo de potência ativa e reativa:

As linhas de M^r relativas às medidas de fluxo possuem apenas um elemento não-nulo e igual a ± 1 na coluna relativa ao elemento medido.

- Medidas de injeção de potência ativa e reativa:

Os termos não-nulos e iguais a ± 1 , nestas linhas de M^r , se localizam nas colunas relativas aos elementos incidentes na barra medida.

O sinal de cada elemento de M^r depende da convenção adotada.

A matriz M^r relativa ao sistema de três barras e três linhas de transmissão da figura II.1 é mostrada abaixo como exemplo das regras de montagem de M^r . No exemplo são considerados positivos os fluxos t_{1-2} , t_{1-3} , t_{2-3} e u_{1-2} , u_{1-3} , u_{2-3} .

		linha 1-2	linha 1-3	linha 2-3
t	t_{1-2}	1		
	t_{3-1}		-1	
	t_{2-3}			1
u	u_{1-2}	1		
	u_{3-1}		-1	
	u_{2-3}			1
p	p_1	1	1	
	p_3		-1	-1
q	q_1	1	1	
	q_3		-1	-1

Os termos não-nulos de cada coluna de M^r correspondem às medidas relacionadas aos elementos da rede.

Uma última e importante ressalva com respeito a matriz M^r deve ser feita. Esta matriz deve conter todos os elementos da rede, inclusive aqueles fora de operação. Isto se deve ao fato de que só assim os erros de configuração devidos à exclusão indevida de elementos poderão ser identificados.

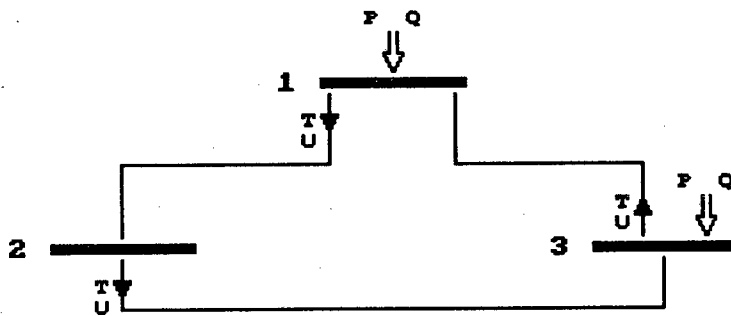


FIGURA II.1

Sistema de 3 barras e 3 linhas de transmissão com plano de medição para montagem da matriz M^r .

APÊNDICE III

CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO SISTEMA IEEE DE 30 BARRAS

----- VARIÁVEIS DE BARRA -----					----- X ----- FLUXOS NAS LINHAS -----			
BARRA	MODULO DA TENSAO	ANGULO	P	Q	LINHA	PARA BARRA	FLUXO ATIVO	FLUXO REATIVO
1	1.0600	0.0	3.052	-.2646				
					1	2	2.071	-.3222
2	1.0450	-6.4634	.1830	.5840	2	3	.9807	.5751E-01
					1	1	-1.996	.4875
					3	4	.5502	.3787E-01
					4	5	.8893	.2293E-01
					5	6	.7396	.3562E-01
3	1.0181	-9.4935	-.2400E-01	-.1200E-01				
					2	1	-.9418	.5802E-01
					6	4	.9177	-.7004E-01
4	1.0092	-11.4819	-.7600E-01	-.1600E-01				
					3	2	-.5342	-.2803E-01
					6	3	-.9870	.9239E-01
					7	6	.8220	-.4646E-01
					8	12	.5432	-.3386E-01
5	1.0100	-15.9630	-.9420	.2127				
					4	2	-.8550	.7692E-01
					9	7	-.8696E-01	.1358
6	1.0018	-13.4389	.0	.0				
					5	2	-.7104	.1402E-01
					7	4	-.8140	.6494E-01
					10	7	.3190	-.5255E-01
					11	8	.3200	.1692E-01
					12	9	.3834	-.8596E-01
					13	10	.2149	.7091E-02
					14	20	.2071	.3552E-01
7	0.9973	-15.0066	-.2280	-.1090				
					9	5	.8827E-01	-.1530
					10	6	-.3163	.4404E-01
8	0.9972	-14.1951	-.3000	-.3600E-01				
					11	6	-.3180	-.2159E-01
					15	20	.1800E-01	-.1439E-01
9	1.0228	-17.9024	.0	.0				
					12	6	-.3834	.1179
					16	10	.3834	.1732
					17	11	.1907E-05	-.2912
10	1.0050	-20.2537	-.5800E-01	-.1800E-01				
					13	6	-.2149	.1852E-01
					16	9	-.3834	-.1546
					18	17	.8757E-01	.3423E-01
					19	20	.1239	.2361E-01
					20	21	.2179	.3976E-01
					21	22	.1109	.2053E-01

----- VARIÁVEIS DE BARRA ----- X -----					----- FLUXO NAS LINHAS -----			
BARRA	MODULO DA TENSÃO	ANGULO	P	Q	LINHA	PARA BARRA	FLUXO ATIVO	FLUXO REATIVO
11	1.0820	-17.9023	.0	.3080				
					17	9	-.1907E-05	.3080
12	1.0271	-19.1916	-.1120	-.7500E-01				
					8	4	-.5432	.1083
					22	13	-.9537E-06	-.3221
					23	14	.9369E-01	.2225E-01
					24	15	.2384	.7088E-01
					25	16	.9916E-01	.4563E-01
13	1.0710	-19.1916	.0	.3358				
					22	12	.9537E-06	.3358
14	1.0105	-20.3639	-.6200E-01	-.1600E-01				
					23	12	-.9260E-01	-.2001E-01
					26	15	.3061E-01	.4005E-02
15	1.0031	-20.6593	-.8200E-01	-.2500E-01				
					24	12	-.2345	-.6324E-01
					26	14	-.3040E-01	-.3019E-02
					27	18	.8200E-01	.3191E-02
					28	23	.1009	.3086E-01
16	1.0093	-20.0422	-.3500E-01	-.1800E-01				
					25	12	-.9809E-01	-.4339E-01
					29	17	.6309E-01	.2539E-01
17	0.9993	-20.6126	-.1500	-.5800E-01				
					18	10	-.8728E-01	-.3349E-01
					29	16	-.6271E-01	-.2451E-01
18	0.9937	-21.6696	-.3200E-01	-.4000E-02				
					27	15	-.8128E-01	-.1728E-02
					30	19	.4929E-01	-.2269E-02
19	0.9909	-22.0485	-.1500	-.1400E-01				
					30	18	-.4913E-01	.2590E-02
					31	20	-.1009	-.1659E-01
20	0.9955	-21.6828	-.2200E-01	-.3000E-02				
					19	10	-.1232	-.2032E-01
					31	19	.1012	.1732E-01
21	0.9946	-21.1101	-.2000	-.2000E-01				
					20	10	-.2162	-.3612E-01
					32	22	.1625E-01	.1613E-01

----- VARIÁVEIS DE BARRA ----- X -----					FLUXOS NAS LINHAS -----			
BARRA	MODULO DA TENSÃO	ÂNGULO	P	Q	LINHA	PARA BARRA	FLUXO ATIVO	FLUXO REATIVO
22	0.9940	-21.1214	.0	.0	21	10	-.1100	-.1864E-01
					32	21	-.1624E-01	-.1607E-01
					33	24	.1262	.3471E-01
23	0.9853	-21.6152	-.5200E-01	-.1600E-01	28	15	-.9971E-01	-.3652E-01
					34	24	.4771E-01	.2052E-01
24	0.9734	-22.2229	-.1500	-.3700E-01	33	22	-.1242	-.3161E-01
					34	23	-.4734E-01	-.1977E-01
					35	25	.2154E-01	.1438E-01
25	0.9643	-22.4903	.0	.0	35	24	-.2141E-01	-.1414E-01
					36	26	.9769E-01	.1702E-01
					37	27	-.7629E-01	-.2881E-02
26	0.9325	-24.5803	-.9500E-01	-.1300E-01	36	25	-.9500E-01	-.1300E-01
27	0.9737	-21.5380	.0	.0	37	25	.7697E-01	.4191E-02
					38	28	-.3045	-.3230E-01
					39	29	.1238	.1601E-01
					40	30	.1045	.1210E-01
28	0.9946	-14.3869	.0	.0	14	6	-.2857	-.4344E-01
					15	8	-.1877E-01	-.2798E-01
					38	27	.3045	.7145E-01
29	0.9404	-24.5156	-.9400E-01	-.9000E-02	39	27	-.1194	-.9271E-02
					41	30	.2544E-01	.2689E-03
30	0.9339	-25.2638	-.1260	-.5000E-02	40	27	-.1007	-.5064E-02
					41	29	-.2527E-01	.6485E-04

