

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

"UM MÉTODO SISTEMÁTICO PARA PRÉ-FILTRAGEM DE MEDI-
DAS NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS
DE POTÊNCIA"

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

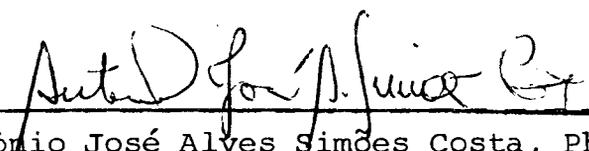
JEANINE MARCHIORI DA LUZ

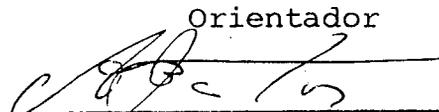
FLORIANÓPOLIS, ABRIL DE 1991

"UM MÉTODO SISTEMÁTICO PARA PRÉ-FILTRAGEM DE MEDIDAS NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA"

JEANINE MARCHIORI DA LUZ

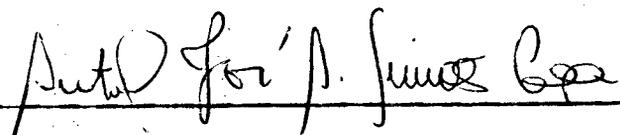
Esta dissertação foi julgada para a obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo curso de pós-graduação.

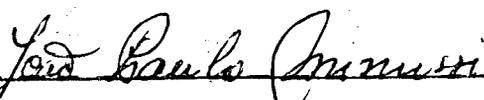

Antônio José Alves Simões Costa, Ph.D.
Orientador


João Pedro Assumpção Bastos, Dr. D'Etat
Coordenador do curso de pós-graduação
em Engenharia Elétrica

Banca

Examinadora:


Antônio José Alves Simões Costa, Ph.D.
Orientador


João Paulo Minussi, Ph.D.


Luiz Jairo Branco Machado, Dr. Ing


Roberto de Souza Salgado, Ph.D.

Ao Lucas, ao Jeancarlo e ao Marco

AGRADECIMENTOS

Ao professor Antônio José Alves Simões Costa meu agradecimento especial pela valiosa orientação no trabalho.

A Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul pelo apoio concedido através do coordenador do Departamento de Engenharia Elétrica, Guilherme Dias; ao engenheiro Egon Seitz do LABELO; ao pessoal do Centro de Processamento de Dados, através do diretor engenheiro Guimarães, da Fernanda e do Garcia; e aos colegas do departamento.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Ao Centro de Processamento de dados da UFSC, especialmente ao Mauro e ao Jaime.

A professora Gladis Bordin Schuch, pelo incentivo, pelo exemplo e pela paciência na hora do desânimo.

A amiga Angélica que foi uma mãe para os meus filhos quando estávamos em Florianópolis.

Aos meus pais, Almir e Ieda, pelo exemplo, estímulo e apoio emocional que sempre me deram. Aos meus irmãos, Josiane, Jeferson, Josele e James, pela grande torcida.

Ao meu marido, Lucas, companheiro de todas as horas, sem o qual certamente as dificuldades seriam mais difíceis de suplantar.

Aos meus filhos, Jeancarlo e Marco, pelo tempo que lhes foi tirado. Que a recompensa possa vir através de uma experiência de vida mais gratificante.

ABSTRACT

This work proposes a systematic procedure for the pre-filtering of gross errors on analog measurements to be submitted to a power system state estimator.

The proposed method is based on the use of graph search techniques and on the application of voltage and current Kirchhoff laws to check the consistency of redundant measurements. The procedure takes into account the random errors associated to the measurements by defining appropriate tolerance margin.

In those situations where the network metering systems exhibits a well distributed redundancy and the gross errors occur on non-interactive measurements, the proposed method is able to correctly identify the bad data. In less favorable situations, the method provides a list of suspect measurements, which can be refined afterwards by using more sophisticated bad data processing techniques.

The proposed method has been applied to small-size and medium-size test systems, considering various metering configurations. The corresponding results are included in this work.

RESUMO

Este trabalho se concentra na proposição de uma metodologia sistemática para a pré-filtragem de erros grosseiros em medidas analógicas, a serem submetidas a um estimador de estados de sistemas de potência.

O método proposto baseia-se na utilização de técnicas de busca em grafos e na aplicação das leis de Kirchhoff de corrente e tensão, para verificar a consistência de medidas redundantes. Neste processo, são levados em conta os erros aleatórios associados às medidas mediante a definição adequada de margens de tolerância.

Em situações em que o plano de medição do sistema de potência apresenta uma redundância bem distribuída e os erros grosseiros ocorrem em medidas não-iterativas, o método proposto é em geral, capaz de identificar corretamente as medidas espúrias. Em situações mais desfavoráveis, espera-se obter como resultado uma lista de medidas suspeitas, que poderá ser refinada mediante a aplicação das técnicas mais elaboradas de processamento de erros grosseiros.

O método proposto foi testado com o auxílio de sistemas de potência de porte pequeno e médio. Os resultados de vários estudos de simulação estão incluídos neste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
SIGLAS	xiv
SIMBOLOGIA	xv
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Considerações iniciais	1
1.1.1 - Operação em tempo real de sistemas de potên- cia	1
1.1.2 - Estimação de estados na operação em tempo real	2
1.1.3 - Objetivo do trabalho	3
1.2 - Revisão bibliográfica	4
1.3 - Organização do trabalho	6
CAPÍTULO 2 - ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	
2.1 - Introdução	8
2.2 - Sistema de aquisição de dados	9
2.3 - Modelo de medição	12
2.4 - Método dos mínimos quadrados ponderados para a es- timação de estados em Sistemas Elétricos de Potência	17
2.5 - Erros grosseiros de medição	22
2.6 - Processamento de medidas portadoras de EGs	25

2.7 - Erros topológicos	31
CAPÍTULO 3 - PRÉ-FILTRAGEM DE ERROS GROSSEIROS EM MEDIDAS	
ANALÓGICAS	33
3.1 - Introdução	33
3.2 - Método proposto	34
3.2.1 - Técnicas de busca em grafos	34
3.2.2 - Cálculo dos estados do sistema	39
3.2.3 - Testes de consistência	47
3.2.3.1 - Testes de magnitude de tensão	48
3.2.3.2 - Testes LKT	53
3.2.3.3 - Testes LKC	62
3.2.4 - Cálculo das margens de tolerância	70
3.2.4.1 - Cálculo da margem de tolerância para tensões complexas calculadas	71
3.2.4.2 - Cálculo da margem de tolerância para fluxos de potência ativa e e reativa calculados	76
3.2.4.3 - Cálculo da margem de tolerância para testes de magnitude de tensão	80
3.2.4.4 - Cálculo da margem de tolerância para testes LKT	81
3.2.4.5 - Cálculo da margem de tolerância para testes LKC	82
3.2.5 - Verificação dos resultados	83
3.3 - Considerações Finais	85
CAPÍTULO 4 - ASPECTOS COMPUTACIONAIS DO MÉTODO PROPOSTO .	
4.1 - Introdução	86
4.2 - Entrada de dados	86

4.3 - Rotinas de desenvolvimento	89
4.3.1 - Cálculo das tensões complexas na barras ...	90
4.3.2 - Cálculo dos fluxos de potência ativa e reativa nas linhas	92
4.3.3 - Cálculo das margens de tolerância	93
4.3.4 - Compilação dos resultados	95
4.4 - Apresentação dos resultados	99
4.5 - Considerações Finais	101
CAPÍTULO 5 - SIMULAÇÕES E RESULTADOS	102
5.1 - Introdução	102
5.2 - Resultados dos testes	102
5.2.1 - Erros grosseiros para o sistema IEEE de 14 barras com 32 medidas	104
5.2.2 - Erros grosseiros para o sistema IEEE de 14 barras com 51 medidas	108
5.2.3 - Erros grosseiros para o sistema IEEE de 14 barras com 102 medidas	111
5.2.4 - Erros grosseiros para o sistema IEEE de 30 barras com 92 medidas	114
5.2.5 - Erros grosseiros para o sistema IEEE de 30 barras com 132 medidas	117
5.2.6 - Erros grosseiros para o sistema IEEE de 30 barras com 178 medidas	121
5.2.7 - Erros grosseiros para o sistema IEEE de 30 barras com 254 medidas	125
5.3 - Análise Global dos Resultados	129
5.4 - Considerações Finais	130

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	131
6.1 - Conclusões	131
6.2 - Utilização dos resultados da Pré-filtragem pelo estimador de estados	133
6.3 - Sugestões para trabalhos futuros	133
APÊNDICE A - FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA CÁLCULO DAS TENSÕES COMPLEXAS DAS BARRAS E CÁLCULO DE FLUXOS DE POTÊNCIA	135
A.1 - Cálculo das tensões complexas nas barras ...	135
A.2 - Cálculo dos fluxos de potência ativa e reativa	136
APÊNDICE B - DERIVADAS PARCIAIS DE $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ E $V_{ij} = V_i - V_j$ COM RESPEITO A P_{ij} E Q_{ij}	138
B.1 - Derivada do ângulo δ_{ij} em relação a P_{ij} ...	138
B.2 - Derivada do ângulo δ_{ij} em relação a Q_{ij} ...	141
B.3 - Derivada de V_{ij} em relação a P_{ij}	141
B.4 - Derivada de V_{ij} em relação a Q_{ij}	143
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144

LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 5.1 - Resultados do sistema IEEE-14 barras com 32 medidas	106
TABELA 5.2 - Resultados do sistema IEEE-14 barras com 51 medidas	110
TABELA 5.3 - Resultados do sistema IEEE-14 barras com 102 medidas	113
TABELA 5.4 - Resultados do sistema IEEE-30 barras com 92 medidas	116
TABELA 5.5 - Resultados do sistema IEEE-30 barras com 132 medidas	119
TABELA 5.6 - Resultados do sistema IEEE-30 barras com 178 medidas	123
TABELA 5.7 - Resultados do sistema IEEE-30 barras com 254 medidas	127

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 2.1 - Fluxograma mostrando a interconexão das rotinas que compõem a monitoração em Tempo Real (TR) de sistema de potência	11
FIGURA 2.2 - Modelo de medição	14
FIGURA 2.3 - Lei normal para os erros de medidas	17
FIGURA 2.4 - Fluxograma simplificado do algoritmo clássico de estimação de estado	21
FIGURA 3.1 - Grafo 1	36
FIGURA 3.2 - Busca em profundidade	37
FIGURA 3.3 - Busca em largura	38
FIGURA 3.4 - Sistema de 5 barras com 12 medidas	41
FIGURA 3.5 - Sistema de 5 barras com 10 medidas	45
FIGURA 3.6 - Sistema de 5 barras com 8 medidas	50
FIGURA 3.7 - Distribuição de probabilidades dos erros de medidas	52
FIGURA 3.8 - Sistema IEEE-14 barras com 22 medidas	56
FIGURA 3.9 - Sistema IEEE-14 barras com 26 medidas	59
FIGURA 3.10 - Sistema de 4 barras	64
FIGURA 3.11 - Sistema IEEE-14 barras com 26 medidas	66
FIGURA 3.12 - Sistema de 2 barras	69
FIGURA 3.13 - Sistema de 5 barras	77
FIGURA 4.1 - Sequência de programas utilizados	87
FIGURA 4.2 - Cálculo da tensão V_j por V _{CALC1}	90
FIGURA 4.3 - Cálculo da tensão V_j por V _{CALC2}	91

FIGURA 4.4	- Estrutura das rotinas utilizadas na implementação do método de Pré-filtragem utilizando a busca em grafos	98
FIGURA 5.1	- Sistema IEEE-14 barras com plano de medição de 32 medidas	106
FIGURA 5.2	- Sistema IEEE-14 barras com plano de medição de 51 medidas	109
FIGURA 5.3	- Sistema IEEE-14 barras com plano de medição de 102 medidas	112
FIGURA 5.4	- Sistema IEEE-30 barras com plano de medição de 92 medidas	115
FIGURA 5.5	- Sistema IEEE-30 barras com plano de medição de 132 medidas	118
FIGURA 5.6	- Sistema IEEE-30 barras com plano de medição de 178 medidas	122
FIGURA 5.7	- Sistema IEEE-30 barras com plano de medição de 254 medidas	126

SIGLAS

EG	: Erro Grosseiro
EESP	: Estimação de Estado em Sistemas de Potência
LKC	: Lei de Kirchhoff para corrente
LKT	: Lei de Kirchhoff para tensão
MTO	: Margem de Tolerância para teste LKT ativo
MTOR	: Margem de Tolerância para teste LKT reativo
MTOV	: Margem de Tolerância para teste de tensão
MTOK	: Margem de Tolerância para teste LKC ativo
MTOKR	: Margem de Tolerância para teste LKC reativo

SIMBOLOGIA

η : redundância

σ : desvio-padrão relativo ao erro de medida

ν : distribuição normal

S : matriz de sensibilidade dos resíduos de estimação

W : matriz de covariância dos resíduos

ρ : desvio padrão do resíduos

χ^2 : distribuição quiquadrada

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações iniciais

1.1.1 - Operação em Tempo Real de Sistemas de Potência

A evolução da tecnologia na área de instrumentação, informática, telecomunicações e controle, paralelamente ao crescimento dos sistemas de potência e a necessidade crescente da operação dos mesmos considerando requisitos como segurança, economia e eficiência, originou o que se chama hoje OPERAÇÃO EM TEMPO REAL DE SISTEMAS DE POTÊNCIA.

Os atuais centros de controle estão equipados com máquinas multiprocessadoras em tempo real, que permitem uma constante avaliação das condições de geração e transmissão de energia através de um subsistema de aquisição de dados de alta velocidade. A interação com o operador é feita através de telas dinâmicas, coloridas e gráficas, possibilitando ao operador, pleno conhecimento da evolução do comportamento do sistema [5].

A principal ferramenta que possibilita a monitoração do sistema em tempo real é a estimação de estados. Através dela pode-se obter as informações atualizadas necessárias às rotinas de avaliação de segurança [5].

1.1.2 - Estimação de Estados na Operação em Tempo Real

A Estimação de Estados em Sistemas de Potência (EESP) permite determinar o estado do sistema, isto é, o módulo e o ângulo da tensão em todas as barras, através do processamento de um conjunto de medidas redundantes efetuadas sobre a rede e enviadas ao centro de operação por um sistema de telemedição.

Nos centros de operação, além do banco de dados estático que contém informações sobre os parâmetros das linhas, existem bancos de dados dinâmicos que armazenam informações sobre "status" dos disjuntores e chaves, medidas analógicas de fluxo, tensão, etc, as quais estão constantemente sendo atualizadas através de telemedição. O estimador de estado faz o processamento das informações telemedidas e, a partir destas, calcula os estados do sistema.

Um atributo fundamental da EESP é o adequado processamento de medidas portadoras de Erros Grosseiros (EGs).

Vários algoritmos e métodos para o processamento de EGs simples e múltiplos tem sido propostos na literatura [2] [3] [8].

A pré-filtragem de medidas é um procedimento realizado previamente à EESP, e destina-se a identificar e remover medidas portadoras de EGs, quando esses erros são flagrantes.

Os erros grosseiros que normalmente surgem associado às medidas são devidos a falhas nos instrumentos de medição, erros na transmissão dos dados, ligações incorretas dos instrumentos de medição, má calibração dos equipamentos, etc [1]. Os algoritmos de pré-filtragem tem por objetivo identificar as medidas grosseiras mais flagrantes e, nos casos em que as circuns-

tâncias não contribuírem para isto, elaboram uma lista de medidas suspeitas a ser submetida a procedimentos mais sofisticados para o processamento de erros grosseiros [3] [8] [21].

Os procedimentos convencionais para pré-filtragem baseiam-se apenas em testes de coerência. São os chamados "testes de plausibilidade" isto é, comparações lógicas simples entre medidas redundantes [13].

Este trabalho parte da constatação de que a adoção de uma metodologia mais sistemática para orientar a realização destes testes de coerência trará maior eficiência ao procedimento de pré-filtragem. Mesmo nos casos em que não for possível identificar conclusivamente as medidas espúrias, a preparação de uma lista de medidas suspeitas é uma tarefa importante, já que os algoritmos mais recentes para processamento de EGs múltiplos procedem ao refinamento de uma lista de observação suspeita, através da aplicação de testes estatísticos mais elaborados [3] [21].

1.1.3 - Objetivo do Trabalho

Este trabalho se propõe a desenvolver um procedimento sistemático para validação de medidas, baseado em técnicas de busca em grafos. Para tal, é desenvolvida uma adaptação de técnicas propostas na literatura para Estimação de Estados e Processamento de Erros Grosseiros [1], a fim de ser utilizada na Pré-Filtragem de medidas.

O objetivo deste trabalho, portanto, é propor um método para detectar a presença de erros grosseiros com amplitude

superior a 20 (vinte) desvios-padrão e elaborar uma lista de medidas suspeitas destes erros.

1.2 - Revisão Bibliográfica

O processamento de EGs na EESP começou a ser analisado quando surgiram os primeiros estimadores, por volta de 1970, e os procedimentos para detecção e identificação de medidas portadoras de EGs foram baseadas na monitoração da soma ponderada dos quadrados dos resíduos (teste $J(\hat{\mathbf{x}})$), e a identificação baseada no resíduo normalizado de maior módulo (teste r_N).

Em 1971, Merrill e Schweppe [10], propuseram a supressão de medidas errôneas pelo uso de uma função-custo-não-quadrática. Neste processo, a influência das medidas cujos resíduos apresentavam os maiores valores absolutos é reduzida aumentando sensivelmente a precisão da estimativa dos estados.

Em 1975, Handschin e outros [8], resumiram os estudos realizados até aquele ano sobre processamento de EGs propondo, também, um método para identificação de múltiplas medidas errôneas. O método consiste em remover simultaneamente as "p" medidas com os maiores valores absolutos de resíduos normalizados ou ponderados e reintroduzi-las uma a uma até que um EG seja detectado. Este procedimento pode ser repetido para identificar todos os erros presentes. Neste mesmo estudo, é comentada a importância da pré-filtragem, porém nada é discutido sobre métodos para sua implementação.

Em 1979, Garcia e outros [7] apresentaram um estimador de estados desacoplado rápido, onde medidas errôneas são elimi-

nadas através de geração de pseudomedidas, apenas citando os teste de limites como os usados na pré-filtragem.

Lugtu e outros [9], em 1980, desenvolveram um método para detecção de erros topológicos. O método é limitado, impondo restrições sobre o plano de medição a ser utilizado, e que determinadas medidas sejam efetuadas sobre a rede, supõe também que os erros topológicos não devem se encontrar numa mesma vizinhança.

Vários outros trabalhos [3] [6] [[8] [18] [21] aparecem na literatura propondo maneiras para identificação de erros grosseiros. Alguns deles mencionam a importancia da pré-filtragem, mas nenhum se detém em considerações sobre o assunto.

Em 1983, Bonanomi e Gramberg [1], propuseram um estimador de estados baseado na técnica de busca em grafos. O método consiste em um cálculo seqüencial das magnitudes e módulos de tensão das barras feitas através de uma busca em largura num grafo da rede. Os fluxos de potência são calculados através das leis de Kirchhoff para corrente e tensão (referidas como LKC e LKT, respectivamente). A validação dos dados é feita através de testes de consistência utilizando as leis de Kirchhoff para corrente e tensão sobre valores medidos que não foram utilizados nos cálculos de tensão, fluxo, etc, isto é, sobre medidas redundantes.

Em 1987, Shultz e outros [14] apresentaram um trabalho onde propõem a substituição de medidas errôneas por valores obtidos através de um simulador baseado em um procedimento de busca em profundidade na rede. Busca-se assim simular o procedimento de um operador do sistema na tentativa de substituir uma medida errada por outra de valor correto.

Em 1988, Saahba [12], propôs um novo método para testes de plausibilidade e processamento de erros grosseiros baseado numa técnica de busca em grafos e utilizando Programação Linear para a identificação das medidas portadoras de erros grosseiros. O procedimento visa a detecção de erros grosseiros interativos e não-interativos e também a detecção de erros topológicos. Similarmente ao método proposto nesta dissertação, é aplicado o método de Bonanomi e Gramberg [1], onde no final da busca no grafo da rede, e conseqüentemente do cálculo dos estados, todas as medidas suspeitas encontradas são removidas e o procedimento da busca é repetido até que mais nenhuma medida suspeita seja detectada. A todos os nós e elementos suspeitos encontrados nestes processamentos, é aplicada a Programação Linear. Quanto maior o número de variáveis envolvidas na Programação Linear, maior é o esforço computacional exigido na solução do problema, tanto no tempo de processamento quanto na capacidade de memória. Esta afirmação é válida no sentido que o método proposto se aplica à pré-filtragem de medidas.

1.3 - 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.

No Capítulo 2 é feita uma revisão do método clássico utilizado para a EESP, bem como do sistema de aquisição de dados e do modelo de medição utilizado.

O método proposto para pré-filtragem de medidas analógicas é apresentado no Capítulo 3 através de exemplos da metodologia utilizada.

No Capítulo 4, são colocados os aspectos computacionais do método incluindo a entrada de dados e as rotinas de desenvolvimento.

Os testes efetuados para os sistemas IEEE-14 barras e IEEE-30 barras, para diversos planos de medição, são apresentados no Capítulo 5.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

2.1 - Introdução

A preocupação com a segurança de um Sistema Elétrico de Potência (SEP) inicia na fase de Planejamento do Sistema, em que se busca obter a máxima segurança com o mínimo custo [4].

Quando os sistemas eram de menor porte, a avaliação da segurança era efetuada pelos próprios operadores através de comunicações telefônicas. Com a expansão dos SEPs em tamanho, classe de tensão e interligações a operação se tornou mais complexa.

Os avanços tecnológicos nas áreas de telemedição e controle de processos através de computadores digitais viabilizaram a análise de segurança de sistemas de potência em tempo real.

A análise de segurança compreende, basicamente, três estágios:

- Monitoração do sistema;
- Análise de contingências;
- Estratégias de correção.

Dentro da Monitoração do sistema, encontra-se a estimação de estados.

Este capítulo visa estabelecer os conceitos básicos sobre estimação de estados, detecção e identificação de erros grosseiros simples.

2.2 - Sistema de aquisição de dados

Uma instrumentação adequada é requisito básico para monitoração de processos físicos.

Os modernos sistemas de instrumentação para monitoração de sistemas de potência consistem de dispositivos que coletam informações em uma Unidade Terminal Remota (UTR) e transmitem-nas aos centros de controle. Estes dispositivos incluem transdutores, sensores e conversores analógico/digital.

Os dados coletados constituem-se de informações analógicas sobre os valores medidos de tensão, injeção e fluxo de potência, etc, além de informações lógicas do tipo "0" ou "1" que traduzem o "status" dos disjuntores e das chaves seccionadoras, indicando se o equipamento está ou não em operação.

As informações lógicas são inicialmente utilizadas por um programa chamado configurador da Rede Elétrica, o qual determina a configuração real da rede que está constantemente sendo atualizada.

As informações analógicas, o resultado do configurador e os parâmetros dos componentes básicos do SEP como linhas de transmissão, transformadores, reatores, etc, são utilizados para calcular a melhor estimativa do estado do sistema. Porém, antes que as informações sejam processadas faz-se necessária a sua validação.

A validação ou pré-filtragem consiste em descartar as informações flagrantemente errôneas por intermédio de testes de verificação de limites, de comparação de informações redundantes ou através da metodologia que será apresentada nos capítulos seguintes.

Uma medida flagrantemente errônea é aquela cujo erro associado é francamente incompatível com a precisão do sistema de aquisição de dados. Testes de pré-filtragem devem ser capazes de detectar erros grosseiros maiores do que 30 desvios-padrão.

Salienta-se aqui a importância do processo de pré-filtragem eficiente, pois quanto melhor o seu resultado mais eficiente e rápido será o processamento das rotinas de verificação de erros grosseiros, associadas ao estimador de estado.

A Figura 2.1 apresenta um fluxograma que mostra a integração da rotina de pré-filtragem com as demais funções da monitoração em tempo real de sistema de potência.

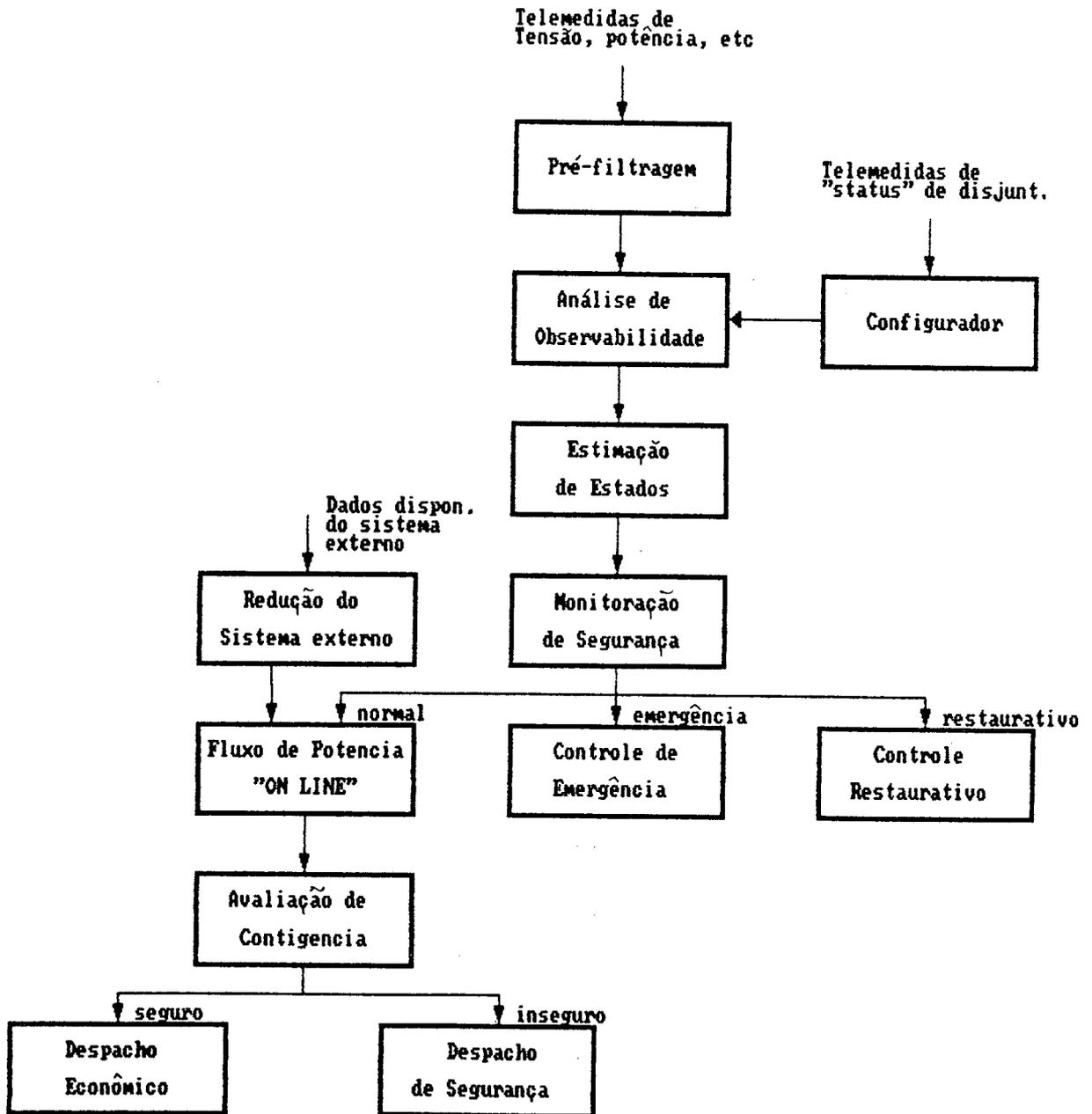


FIGURA 2.1 - Fluxograma mostrando a interconexão das rotinas que compõem a monitoração em Tempo Real (TR) de sistema de potência.

2.3 - Modelo de Medição

A técnica de estimação de estado fornece um meio de processar um conjunto de medidas redundantes para obter um valor estimado para as variáveis que representam o módulo e o ângulo da tensão. Uma vez que as variáveis de estado estejam determinadas, outras grandezas de interesse podem ser obtidas.

Uma propriedade fundamental deste processo de solução, é que ele determina o "valor médio" das grandezas avaliadas. Assim, os valores calculados, em geral, não são iguais a nenhuma das medidas. Ao invés disso a solução encontrada é a "melhor" solução para aquele conjunto de dados de entrada representando uma média de todos os valores obtidos.

A condição necessária para utilização do programa de estimação de estado é que o sistema seja observável [22] [23]. Um dos requisitos para a observabilidade é que o conjunto de medidas analógicas da rede seja maior ou igual ao número de estados, isto é:

$$m \geq n \quad (2.1)$$

$$n = 2N - 1 \quad (2.2)$$

onde:

m - número de medidas efetuadas sobre a rede;

n - número de estados do sistema;

N - número de barras do sistema.

Além disso, é necessário que a distribuição destas medidas seja tal que permita realizar o cálculo da magnitude e ângulo das tensões em todas as barras do sistema. Assim diz-se que um sistema é observável, quando o conjunto de medidas, efetuadas sobre a rede, permite calcular os estados da mesma [22] [23].

Define-se redundância global como a relação entre o número de medidas efetuadas e o número de estados a serem estimados, isto é:

$$\eta = \frac{m}{n} = \frac{m}{2N-1} \quad (2.3)$$

onde:

η - redundância.

O fato de haver medidas redundantes sobre a rede é importante, pois é através destas que é possível se realizar o adequado processamento de medidas grosseiras [1] [2] [3] [10] [18].

A redundância das medidas em geral assume valores maiores do que 1. Quando a redundância do sistema é igual a 1, todas as medidas são consideradas críticas, pois a perda ou retirada de uma delas torna o sistema não observável, impedindo a execução do programa de estimação de estados. Vários trabalhos já publicados tratam deste assunto [24] [25].

Considere-se agora, um sistema de potência genérico de N barras cujos parâmetros e configuração sejam conhecidos. Neste

sistema, são efetuadas "m" medidas, que podem ser representadas conforme a Figura 2.2.

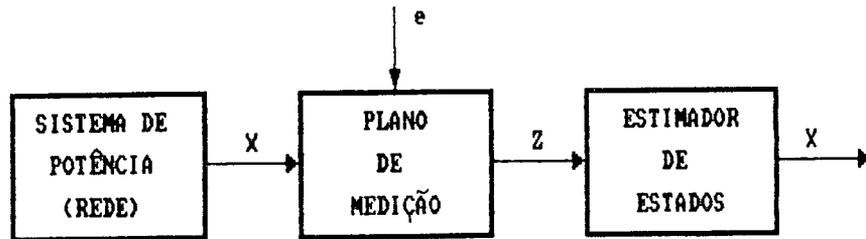


FIGURA 2.2 - Modelo de medição.

O estimador de estado estático pode ser definido como uma função que, a partir de um conjunto de medidas \underline{z} , contaminadas por ruídos, permite determinar um vetor \underline{x} que representa a melhor estimativa possível para o vetor de estado da rede elétrica.

Da Figura 2.2 obtém-se:

$$\underline{z} = h(\underline{x}) + \underline{e} \quad (2.4)$$

onde:

- \underline{z} - vetor das medidas (mx1);
- $h(.)$ - vetor das funções não lineares que relacionam os estados às quantidades medidas (mx1);
- \underline{x} - vetor de estados verdadeiros (nx1);
- \underline{e} - vetor dos erros de medição (mx1).

O vetor das variáveis de estado, \underline{x} , é formado por N-1 ângulos de tensão de barra, pois considera-se o ângulo da barra de referência igual a zero, e N módulos de tensão de barra.

O vetor das medidas \underline{z} pode incluir todas as quantidades mensuráveis, relacionadas ao vetor de estados. Porém, as medidas mais comumente efetuadas são: módulos das tensões nas barras, fluxos de potência ativa e reativa nas linhas e injeções de potência ativa e reativa nas barras.

O vetor dos erros de medidas " \underline{e} " representa os erros inerentes ao conjunto de equipamentos de aquisição de dados. Para uma medida válida, o elemento correspondente ao vetor " \underline{e} " pode ser modelado como uma variável aleatória com distribuição normal [13] [26], tal que:

$$E\{e_i\} = 0 \quad (2.5)$$

$$E\{e_i^2\} = \sigma^2 \quad (2.6)$$

onde:

$E\{.\}$ - é o operador expectância;

σ - é o desvio padrão relativo ao erro na medida i .

Quando se trata de uma medida portadora de um erro grosseiro, o erro pode ser modelado como uma quantidade determinística desconhecida cuja amplitude é consideravelmente superior a três (3) desvios-padrão [28].

Para um conjunto de medidas, isentas de erros grosseiros e não correlacionadas, pode-se escrever:

$$E\{\underline{e}\} = \underline{0} \quad (2.7)$$

$$E \{ \underline{e} \underline{e}^T \} = R = \text{diag} \{ \sigma_{11}^2, \sigma_{22}^2, \sigma_{mm}^2 \} \quad (2.8)$$

onde a matriz R, chamada matriz de covariância dos erros de medição, é suposta diagonal tendo por base a hipótese de que os erros de medição são não-correlacionados entre si.

As variâncias das medidas σ_{ii}^2 são, em geral, dependentes do valor medido, da precisão do equipamento responsável pela aquisição de dados e, ainda, do valor de plena escala do instrumento de medição [13] [26].

Além das hipóteses representadas por (2.7) e (2.8) costuma-se ainda admitir que os erros de medida obedecem a uma distribuição normal $\mathcal{N} \sim [0, \sigma_i^2]$, com média zero e variância igual a σ_i^2 , conforme mostrado na Figura 2.3.

O significado desta função densidade de probabilidade chamada Normal ou Gaussiana é o seguinte [5]:

- 68% dos erros das medidas estão dentro de ± 1 desvio-padrão;
- 95% dos erros das medidas estão dentro de ± 2 desvios-padrão;
- 99% dos erros das medidas estão dentro de ± 3 desvios-padrão.

Deve-se ainda comentar a respeito do que se convencionou chamar de pseudomedida.

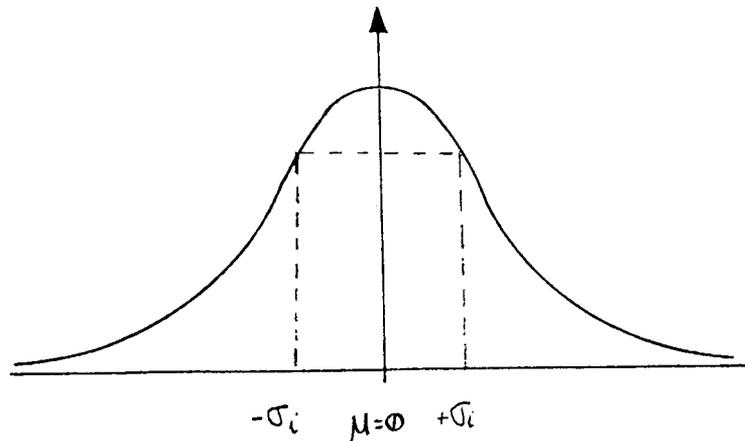


FIGURA 2.3 - Distribuição normal para os erros de medida.

Pseudomedida é uma informação, não obtida por telemensuração, sobre alguma grandeza de interesse para a estimação de estados como fluxo, injeção, tensão, etc [13] [26].

As pseudomedidas são utilizadas, por exemplo, quando há necessidade de se completar o conjunto de medidas para garantir a observabilidade do sistema e, conseqüentemente, a estimação dos estados.

Um exemplo de uma pseudomedida é a injeção de potência numa barra de passagem, cujo valor é igual a zero. Outro exemplo é considerar uma pseudomedida de injeção calculada através de um algoritmo de previsão de carga.

2.4 - Método dos mínimos quadrados ponderados para a estimação de estados em Sistemas Elétricos de Potência

Esta técnica bem conhecida da teoria da estimação de estados, consiste na determinação do menor erro quadrático entre

as medidas e os valores estimados correspondentes, e se aplica tanto ao alisamento estatístico de dados, quanto à recuperação de medidas errôneas.

Como não é possível determinar o estado real do sistema, " \underline{x} ", busca-se uma solução através de uma boa estimativa deste, denominada " $\underline{\hat{x}}$ ", através da minimização de uma função custo. A função custo, geralmente utilizada, é a soma dos quadrados ponderados dos resíduos de estimação. Um resíduo de estimação é a diferença entre o valor medido de uma variável e o seu estado estimado [13] [26].

Seja " $\underline{\hat{x}}$ " o valor de \underline{x} que minimiza a seguinte função:

$$J(\underline{\hat{x}}) \triangleq \sum_{i=1}^m (1/\sigma_i^2) [z_i - h_i(\underline{\hat{x}})]^2 \quad (2.9)$$

onde:

σ_i : desvio padrão dos erros e_i da medida z_i , com os e_i sendo variáveis aleatórias com distribuição normal e não correlacionadas entre si;

$\underline{z} - \underline{h}(\underline{\hat{x}})$: vetor dos resíduos de estimação;

$\underline{\hat{x}}$: vetor dos estados estimados.

Se R é a matriz de covariância dos erros de medição podemos reescrever (2.9) como segue:

$$J(\underline{\hat{x}}) = [\underline{z} - \underline{h}(\underline{\hat{x}})] R^{-1} [\underline{z} - \underline{h}(\underline{\hat{x}})] \quad (2.10)$$

Observa-se que a ponderação para os resíduos é maior quanto menor for a variância do erro, isto é, quanto mais precisa for a medida. Com isto, deduz-se que as medidas mais precisas contribuem com maior peso para a estimativa de $\hat{\underline{x}}$.

Para determinar $\hat{\underline{x}}$, que é o valor de \underline{x} que minimiza $J(\hat{\underline{x}})$, parte-se da condição necessária para que $\hat{\underline{x}}$ seja uma solução ótima mínima local de $J(\hat{\underline{x}})$ [13].

$$\left. \frac{\partial J(\underline{x})}{\partial \underline{x}} \right|_{\underline{x}=\hat{\underline{x}}} = 0 \quad (2.11)$$

Definindo-se a matriz Jacobiana de $h(x)$ como:

$$H(\underline{x}) = \frac{\partial \underline{h}(\underline{x})}{\partial \underline{x}} \quad (2.12)$$

obtém-se:

$$H(\underline{x}) R^{-1} \underline{h}(\underline{x}) = H(\underline{x}) R^{-1} \underline{z} \quad (2.13)$$

A equação (2.13) corresponde a um sistema de equações não-lineares em $\underline{h}(\underline{x})$ o que dificulta a solução do problema. Por isso, a solução é obtida através de um processo iterativo baseado na linearização de $\underline{h}(\cdot)$, conforme apresentado a seguir:

Sejam \underline{x}^k e \underline{x}^{k+1} , os estados estimados nas iterações k e $k+1$, respectivamente. A expansão em série de Taylor em torno de $\hat{\underline{x}}_k$, truncada na primeira ordem, nos fornece:

$$\underline{h}(\underline{x}^{k+1}) = \underline{h}(\underline{x}^k) + H(\underline{x}^k) \Delta \underline{x} \quad (2.14)$$

onde:

$$H(\underline{x}^k) = \left. \frac{\partial h(\underline{x})}{\partial \underline{x}} \right|_{\underline{x}=\underline{x}^k} \quad (2.15)$$

$$\Delta \underline{x} = \underline{x}^{k+1} - \underline{x}^k \quad (2.16)$$

onde $H(\underline{x}^k)$ é a matriz Jacobiana ($m \times n$), calculada em $\underline{x}=\underline{x}^k$ e $\Delta \underline{x}$ é o vetor incremental de estados ($n \times 1$).

Após a linearização, substituindo (2.14) em (2.13) chega-se ao modelo de medição linearizado conforme mostrado a seguir:

$$H^T(\underline{x}^k) R^{-1} [h(\underline{x}^k) + H(\underline{x}^k) \Delta \underline{x}] = H^T R^{-1} \underline{z} \quad (2.17)$$

$$H^T(\underline{x}^k) R^{-1} H(\underline{x}^k) (\underline{x}^{k+1} - \underline{x}^k) = H^T R^{-1} [\underline{z} - h(\underline{x}^k)] \quad (2.18)$$

$$\underline{x}^{k+1} = \underline{x}^k + [H^T(\underline{x}^k) R^{-1} H(\underline{x}^k)]^{-1} H^T(\underline{x}^k) R^{-1} [\underline{z} - h(\underline{x}^k)] \quad (2.19)$$

Chamando:

$$\Delta \underline{z} = \underline{z} - h(\underline{x}^k) \quad (2.20)$$

a equação (2.19) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\underline{x}^{k+1} = \underline{x}^k + [H^T(\underline{x}^k) R^{-1} H(\underline{x}^k)]^{-1} H^T(\underline{x}^k) R^{-1} \Delta \underline{z} \quad (2.21)$$

O procedimento iterativo é repetido até que algum critério de parada seja satisfeito. Um critério de parada pode ser:

$$\max \{ x_i \} < \epsilon \quad (2.22)$$

Isto é, o processo iterativo pára quando o componente do vetor $\Delta \underline{x}$ de maior valor absoluto é menor do que uma tolerância pré-especificada ϵ .

A Figura 2.4 apresenta um fluxograma simplificado do algoritmo clássico da estimação de estados.

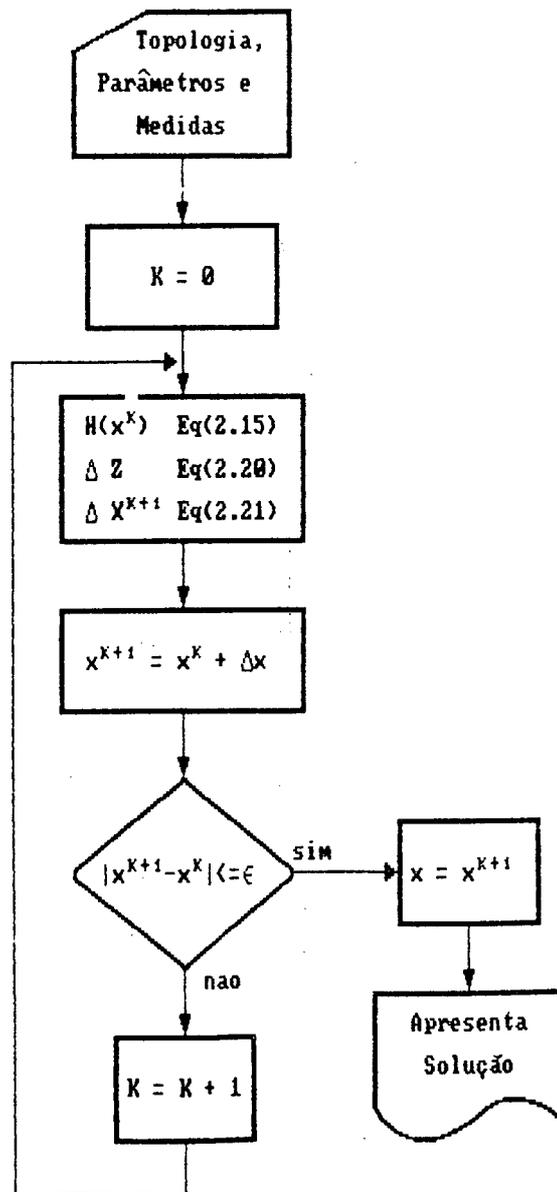


FIGURA 2.4 - Fluxograma simplificado do algoritmo clássico de estimação de estado.

2.5 - Erros Grosseiros de Medição

Os dados utilizados no processo de estimação de estados podem apresentar erros, os quais poderão prejudicar o resultado do estimador, e com isso induzir à tomada de ações de controle indevidas, e desse modo prejudicar a operação do sistema.

Os erros podem ser classificados em [3] [8]:

- erros aleatórios de medição;
- erros grosseiros de medição;
- erros de configuração da rede;
- erros nos parâmetros da rede.

Os erros aleatórios de medição, que são os ruídos normais, inerentes ao próprio sistema de medição-comunicação, são filtrados pelo próprio estimador, e possuem média e variância conhecidas.

Os erros grosseiros de medição são os provenientes de falhas nos medidores, nos instrumentos de medição, TPs e TCs, nos transdutores, no sistema de transmissão de dados, etc.

Os ruídos normais raramente ultrapassam a três (3.0) desvios-padrão, ao passo que EGs podem apresentar amplitudes superiores a 20 desvios-padrão.

Os erros topológicos são erros que ocorrem devido a falhas no sistema de aquisição de dados e são provenientes da má configuração de um ou mais elementos da rede (linhas de transmissão, transformadores, etc).

Os erros nos parâmetros da rede podem ocorrer por imprecisão nos cálculos das características dos componentes do sistema de energia elétrica, por alteração devido ao envelhecimento dos equipamentos ou ainda devido a alterações ambientais.

Os EGs de medição podem ser classificados:

a - Quanto ao número de EGs:

- . Simples : apenas 1 EG;
- . Múltiplos : mais de 1 EG.

Os EGs múltiplos podem ser [8]:

- Interativos : existe forte correlação entre os resíduos associados às medidas grosseiras;
- Não-Interativos : em caso contrário.

Pode acontecer de EGs incidirem em medidas eletricamente próximas e/ou fortemente correlacionadas. Quando isto acontece, o resíduo de estimação dessas medidas pode conter informação não só do EG nela incidente, como também de outros EGs incidentes nas outras medidas. Devido a este fato é que esses erros são chamados interativos [3] [8].

Outro fato que pode ocorrer é uma medida válida apresentar um módulo de resíduo grande o suficiente para se tornar suspeita de ser portadora de EG. Esta hipótese deve ser contemplada em um bom algoritmo de identificação de medidas errôneas.

A forma mais comum da ocorrência de EGs múltiplos, é quando um mesmo equipamento é utilizado para adquirir ou transmitir mais do que um dado, e este equipamento apresenta proble-

mas quanto a confiabilidade de seus dados. Se isto ocorrer, essas informações obtidas ou transmitidas formarão um conjunto deteriorado de dados que participarão do programa de estimação de estados, resultando em dificuldades na estimação dos mesmos.

b - Quanto à detectabilidade:

- Detectáveis : quando ocorrem em medidas não críticas (ver definição de medida crítica na seção 2.3);
- Não-detectáveis : quando ocorrem em medidas críticas.

c - Quanto à identificabilidade:

- Identificáveis : se a medida não pertence a um conjunto crítico;
- Não-identificáveis : se a medida pertence a um conjunto crítico.

É necessário que se proceda a definição de conjunto crítico.

Conjunto crítico é um subconjunto de medidas tal que a remoção de qualquer uma delas torna simultaneamente críticas as medidas restantes [25].

É importante ressaltar que os conceitos de observabilidade de medidas e conjuntos críticos estão associados à quantidade, localização e tipo das medidas, ou seja, são conceitos relacionados às estruturas dos sistemas elétricos e de medição [24].

2.6 - Processamento de Medidas Portadoras de Erros Grosseiros

O objetivo final do processamento de erros grosseiros, é evitar que os mesmos prejudiquem o desempenho do estimador.

Para isso é necessário que as rotinas de processamento de EGs, tratem de detectar, identificar e remover as medidas errôneas, as quais não foram detectadas pelas rotinas de pré-processamento das medidas, garantindo com isso uma estimação precisa dos estados do sistema.

Os métodos descritos na literatura, para estes procedimentos, são baseados no cálculo dos resíduos de estimação.

Os resíduos de estimação são combinações lineares dos erros de medição, por isso algumas propriedades desses resíduos ou de funções deles serão desenvolvidos a seguir.

Considere as seguintes relações:

$$\underline{z} = \underline{h}(\underline{x}) + \underline{e} \quad (2.21)$$

$$\underline{r} = \underline{z} - \underline{h}(\hat{\underline{x}}) \quad (2.22)$$

$$\underline{H}^T \underline{R}^{-1} \underline{r} = \underline{0} \quad (2.23)$$

Considere, ainda, que a diferença $\underline{x} - \hat{\underline{x}}$ é pequena, pode-se escrever:

$$\underline{h}(\underline{x}) \cong \underline{h}(\hat{\underline{x}}) + \underline{H} (\underline{x} - \hat{\underline{x}}) \quad (2.24)$$

Operando com as equações (2.21), (2.23) em (2.24), obtêm-se:

$$\underline{r} = \underline{z} - [\underline{h}(\underline{x}) - H (\underline{x} - \hat{\underline{x}})] \quad (2.25)$$

$$\underline{r} = H (\underline{x} - \hat{\underline{x}}) + \underline{e} \quad (2.26)$$

$$H^T R^{-1} [H (\underline{x} - \hat{\underline{x}}) + \underline{e}] = \underline{0} \quad (2.27)$$

$$(\underline{x} - \hat{\underline{x}}) = - [H^T R^{-1} H]^{-1} H^T R^{-1} \underline{e} \quad (2.28)$$

Conclui-se, observando (2.8) e (2.28), que o valor esperado para o vetor dos erros de estimação $(\underline{x} - \hat{\underline{x}})$, quando não existirem EGs, é zero, ou seja:

$$E (\underline{x} - \hat{\underline{x}}) = \underline{0} \quad (2.29)$$

Substituindo (2.28) em (2.26), obtêm-se:

$$\underline{r} = - H (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} \underline{e} + \underline{e} \quad (2.30)$$

$$\underline{r} = [I - H (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1}] \underline{e} \quad (2.31)$$

$$\underline{r} = S \underline{e} \quad (2.32)$$

onde:

S : é a matriz de sensibilidade dos resíduos de estimação (m x n).

Admite-se que os elementos da matriz S sejam determinísticos. Portanto, o valor esperado para os resíduos de estimação, na ausência de EGs, pode ser obtido das relações (2.18) e (2.31):

$$E\{\underline{r}\} = \underline{0} \quad (2.33)$$

É possível verificar que a matriz de covariância dos resíduos, W , é [8] [13]:

$$W \triangleq \text{cov}(\underline{r}) = E\{\underline{r} \underline{r}^T\} \quad (2.34)$$

$$E\{\underline{r} \underline{r}^T\} = R - H [H^T R^{-1} H]^{-1} H^T = S R \quad (2.35)$$

Verifica-se, pela equação (2.31), que os resíduos são combinações lineares dos erros de medição. Isto significa que os resíduos contêm informações sobre os erros de medição. Portanto, através deles pode-se detectar a presença ou não de erros nos valores medidos.

Pode-se concluir que, se as medidas não estão contaminadas por erros grosseiros, e os erros de medição apresentarem distribuição normal, os resíduos de estimação também serão normalmente distribuídos, com média zero e covariância W . Isto decorre do fato de que uma variável aleatória formada pela combinação linear de diversas variáveis aleatórias, com distribuição normal, tende à distribuição normal [17]. Assim:

$$\underline{r} \sim N(\underline{0}, W) \quad (2.36)$$

O desvio padrão ρ_{ii} , relativo a um componente de \underline{r} , é igual a raiz quadrada do correspondente elemento diagonal de W [17]:

$$\rho_{ii} = \sqrt{W_{ii}} \quad (2.37)$$

Em função dos vários métodos desenvolvidos e apresentados na literatura, no contexto da detecção e identificação de erros grosseiros, são importantes as seguintes definições [8] [13]:

- Resíduo ponderado r_w

$$r_{w,i} \triangleq \frac{r}{\sigma_{ii}} \quad (2.38)$$

- Resíduo normalizado r_N

$$r_{N,i} = \frac{r}{\rho_{ii}} \quad (2.39)$$

Como já foi apresentado, existem diversos métodos para a detecção e a identificação de EGs [3] [8] [10] [14] [15] [18] [21]. A seguir será feito um breve comentário a respeito de alguns destes métodos.

A detecção 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 λ de modo que [3]:

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

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

onde:

H_0 : não existem erros grosseiros;

H_1 : existem erros grosseiros.

O limiar λ 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 $J(\hat{\underline{x}})$. As principais características do teste $J(\hat{\underline{x}})$ são a sua simplicidade e o seu baixo custo computacional.

Uma outra maneira para se identificar uma medida portadora de erros é utilizar o método do máximo resíduo normalizado, no qual é considerada errônea a medida que possuir o resíduo normalizado de maior magnitude. É o chamado Teste r_N , que detecta e identifica os erros grosseiros simultaneamente, [8].

Se:

$$\max |r_{Ni}| \geq \gamma \quad (2.40)$$

então a medida i é declarada como portadora de erros.

Alternativamente, o método apresentado por Mili e outros [21] e Amaral e Simões Costa [3] [30] se aplica à identificação de EGs múltiplos utilizando testes de hipóteses. Primeiramente é formada uma relação de medidas suspeitas, S_0 , composta pelas medidas cujas magnitudes dos resíduos excedem a um valor pré-determinado (adotado como igual a 3 nas referências [3] [30]). Esta lista S_0 sofre um refinamento preliminar que con-

siste 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 $J(\hat{\mathbf{x}})$ 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 os valores estimados dos erros nas medidas pertencentes a S_0 .

Garcia e Monticelli apresentam na referência [15] uma outra metodologia para a detecção e identificação de erros grosseiros denominados Teste- \hat{b} . Conforme os autores, este método é mais eficiente para a detecção que o Teste $J(\hat{\mathbf{x}})$, o qual não tem um bom desempenho para erros de magnitude na faixa de 3 a 20 desvios-padrão.

Este método consiste na avaliação do parâmetro \hat{b}_1 dado por:

$$\hat{b}_1 = \frac{|z_i - \tilde{z}_i|}{\sigma_i} \quad (2.41)$$

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}_1 é calculado para a medida que possuir maior resíduo normalizado em valor absoluto. Se \hat{b}_1 for maior que

um certo limiar então a medida i é considerada portadora de erro grosseiro.

Para a identificação de erros múltiplos pode ser utilizado o Teste- \hat{b} através da aplicação do método de identificação por eliminação - IPE, como é apresentado em [3]. Neste método as medidas consideradas errôneas pelo Teste- \hat{b} são sucessivamente eliminadas até que todos os erros grosseiros sejam removidos.

2.7 - Erros Topológicos

Os erros topológicos são falhas decorrentes da má configuração de um ou mais elementos da rede, e ocorrem devido a falhas no sistema de aquisição de dados [27]. Por elementos da rede entendem-se linhas de transmissão, transformadores, capacitores e indutores em conexão transversal (elementos "shunt"). A configuração errônea 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.

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:

- 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 : esta situação é 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 de erros de inclusão e de exclusão.

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.

Os trabalhos [9] [27] apresentam uma metodologia para detecção e identificação destes tipos de erros.

CAPÍTULO 3

PRÉ-FILTRAGEM DE ERROS EM MEDIDAS ANALÓGICAS

3.1 - Introdução

Os dados utilizados nos procedimentos de supervisão e controle, de um sistema de potência, devem ser os mais confiáveis possíveis, de modo que a análise de segurança em tempo real forneça resultados igualmente confiáveis, possibilitando que a operação do sistema seja executada de modo seguro e eficiente.

Para alcançar estes objetivos são necessários mecanismos para detectar, identificar e eliminar as medidas portadoras de EGs, garantindo assim um bom desempenho do programa estimador de estados.

Neste trabalho, é proposto um método a ser utilizado para o pré-processamento de medidas, cujo objetivo é detectar e identificar medidas cujo erro associado tem ordem de grandeza superior a cerca de 20 desvios-padrão. O método fornece uma lista de medidas suspeitas de conterem EGs, a qual deve ser considerada como uma filtragem inicial às medidas utilizadas para a estimação de estados. A partir de um procedimento de busca em grafos, são calculados os ângulos e os módulos de tensão e a validação dos dados é realizada utilizando as leis de Kirchhoff para corrente e tensão. Em suma, procura-se verificar, de modo sistemático a compatibilidade entre medidas redundantes.

O método de pré-filtragem proposto é inspirado no método de estimação e processamento de erros grosseiros apresen-

tado em [1]. Entretanto a necessidade de compatibilização com as exigências de tempo de execução impostas sobre a pré-filtragem tornaram necessárias várias adaptações e alterações nos procedimentos de classificação (pontuação) das medidas e de tomada de decisão, conforme será descrito nas seções seguintes.

3.2 - Método Proposto

O método compreende basicamente três etapas:

- cálculo dos estados do sistema;
- execução de testes;
- verificação dos resultados.

Cada etapa será detalhada posteriormente. A seguir efetuar-se-á uma descrição das técnicas de busca em grafos, que são essenciais à concepção do método.

3.2.1 - Técnicas de busca em grafos

A técnica da busca em grafos visa resolver o problema da exploração de um grafo.

Um grafo $G(V,E)$ é definido como um conjunto finito não vazio V e um conjunto E , de pares não-ordenados, com elementos distintos de V . Os elementos de V e E representam os vértices e as arestas de G , respectivamente. Todo grafo acíclico e conexo é denominado árvore [16] [28].

Uma outra maneira para se definir árvore é através do teorema que diz: "um grafo G é uma árvore se e somente se existir um único caminho entre cada par de vértices de G " [16] [28].

Para solucionar problemas algoritmos em grafos, a busca ocupa um lugar de destaque.

As técnicas de busca em grafos visam resolver um problema básico, qual seja, obter um processo sistemático de como caminhar pelos vértices e arestas dos mesmos.

Existem vários procedimentos utilizados para a realização da busca. Nesta seção serão apresentados, de maneira sucinta, duas formas para a realização da busca:

- busca em profundidade;
- busca em largura.

a - Busca em Profundidade

Uma busca é dita em PROFUNDIDADE [16] [28] quando o critério de escolha de vértice a partir do qual será realizada a próxima exploração de aresta, obedecer ao seguinte: "entre todos os vértices marcados e incidentes a alguma aresta ainda não explorada, escolher aquele mais recentemente alcançado na busca".

Este tipo de busca pode ser implementada com auxílio de uma "pilha", onde o último elemento colocado na "pilha", será o primeiro elemento a ser retirado da mesma. Neste caso, o último vértice a ser colocado na pilha, será também o primeiro a ser retirado. A ordem em que os vértices são inseridos e/ou retirados da pilha é importante. O processo termina quando a "pilha" estiver vazia.

Para exemplificar a busca em profundidade, considerar o grafo da Figura 3.1.

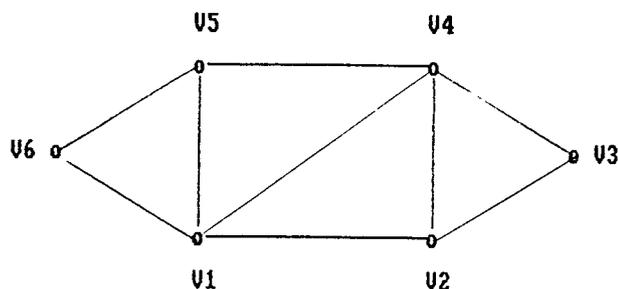


FIGURA 3.1 - Grafo 1.

Supondo-se que a busca inicia no vértice V_1 , o qual é considerado raiz, são colocadas na árvore todas as arestas ligadas a V_1 , e que não formam uma malha fechada. A Figura 3.2 apresenta uma árvore para o grafo da Figura 3.1.

Na Figura 3.2, as linhas cheias correspondem as arestas da árvore e as linhas pontilhadas aos elementos da co-árvore. A co-árvore de um grafo compreende todos os elementos do grafo que não pertencem a árvore.

Os resultados apresentados correspondem a busca em profundidade de grafos conexos.

Para grafos não-conexos aplica-se a busca a seus componentes conexos, separadamente.

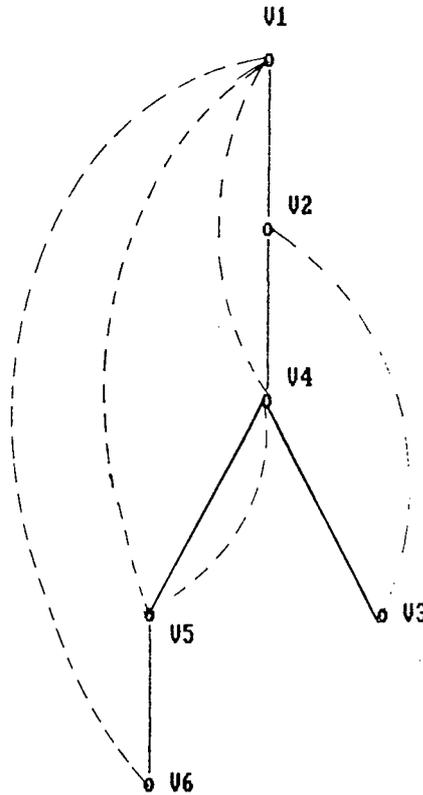


FIGURA 3.2 - Busca em Profundidade

b - Busca em Largura

Uma busca é dita em largura [16] [28] quando o critério de escolha de vértice marcado obedecer ao seguinte: "dentre todos os vértices marcados e incidentes a alguma aresta ainda não explorada, escolher aquele menos recentemente alcançado na busca". Entende-se por vértice marcado, todo o vértice que já tenha sido "visitado" na ocorrência da busca.

Este tipo de busca pode ser implementado com o auxílio de uma "fila", onde o primeiro elemento a ser colocado na "fila", é o primeiro a ser retirado da mesma. Isto é, a medida

que cada vértice é visitado ele vai sendo colocado na "fila". O primeiro vértice colocado na "fila", será o primeiro a ser considerado para a continuação da busca. A medida que um vértice é considerado, ele é retirado da "fila". O processo termina, quando não houver mais vértices na "fila" para serem visitados.

Para exemplificar a busca em largura considera-se novamente o grafo da Figura 3.1.

A Figura 3.3 mostra uma árvore relativa ao grafo da Figura 3.1.

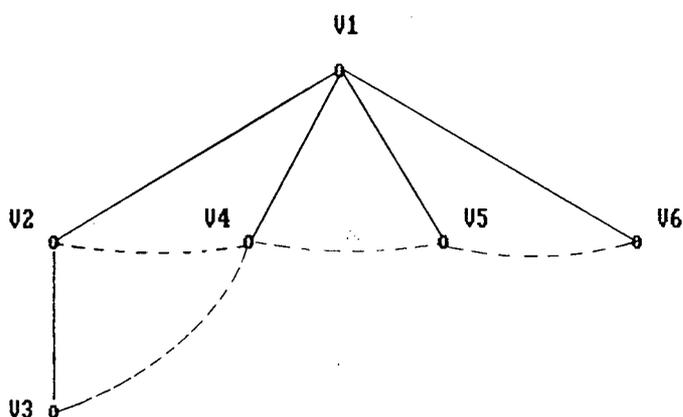


FIGURA 3.3 - Busca em largura

Para casos de grafos desconexos, a busca em largura pode ser aplicada, porém, separadamente, para cada um de seus componentes conexos.

Outros tipos de busca podem ser implementados, porém, não serão aqui comentados pois fogem do escopo deste trabalho.

3.2.2 - Cálculo dos estados do sistema

O cálculo dos estados do sistema é um procedimento sistemático que utiliza as equações de fluxo de potência para determinar as tensões complexas das barras.

O cálculo inicia em uma barra onde a magnitude de tensão é medida. Arbitra-se, para esta barra, ângulo de fase de tensão igual a zero e todos os outros ângulos de tensão de fase são calculados em relação a esta barra considerada como referência.

As medidas de fluxo de potência para as linhas, quando houver, devem ser tomadas aos pares, isto é, devem ser medidos os fluxos ativo e reativo numa ou em ambas as extremidades da linha, para cada linha. Isto é necessário, pois são utilizadas as medidas de fluxo ativo e o ângulo de fase da tensão de barra conhecida para calcular o ângulo na barra adjacente àquela, e medidas de fluxo reativo e magnitude de tensão para calcular a magnitude da tensão na mesma.

A sequência de cálculo é feita utilizando o método de busca em grafos, mais especificamente, o método de busca em largura.

Através das equações abaixo, são calculadas as tensões complexas para todas as barras adjacentes a barra considerada, isto é, para todas as barras que possam ser alcançadas atravessando uma única linha.

$$E_{ij} = \frac{Z (P_{ij} - j Q_{ij})}{V_i} - \frac{V_i Y}{2} \quad (3.1)$$

sendo:

$$E_{ij} = E_i - E_j \quad (3.2)$$

$$V_j = |V_i - E_{ij}| \quad (3.3)$$

$$\delta_j = \text{arc tg} \frac{\text{Im} (V_i - E_{ij})}{\text{Re} (V_i - E_{ij})} \quad (3.4)$$

onde:

- E_i : tensão complexa na barra i ;
- E_j : tensão complexa na barra j ;
- V_i : magnitude de tensão na barra i ;
- V_j : magnitude de tensão na barra j ;
- δ_i : ângulo de tensão na barra i ;
- δ_j : ângulo de tensão na barra j ;
- P_{ij} : fluxo de potência ativa medida na linha em i ;
- Q_{ij} : fluxo de potência reativa medida na linha em i ;
- $Z = R + jX$: impedância da linha;
- $Y = jB$: admitância shunt da linha.

Utilizando-se a Figura 3.4, será ilustrado um procedimento de cálculo para uma parte da rede IEEE-14 barras, supondo que a busca inicia na barra 1.

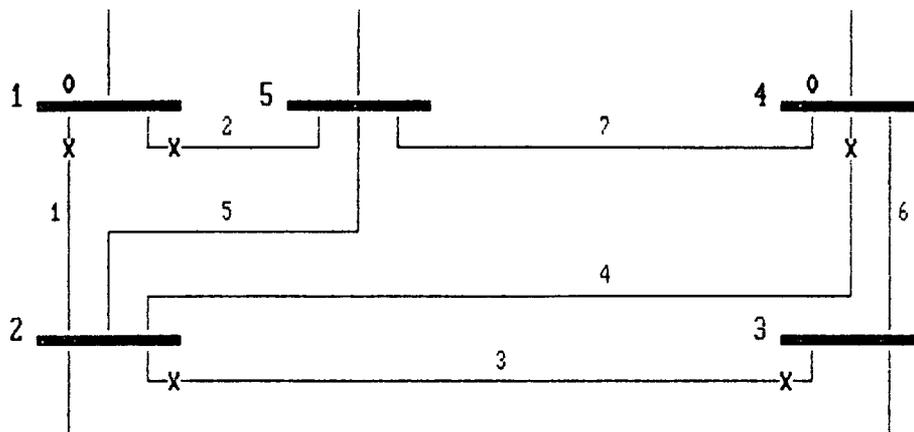


FIGURA 3.4 - Sistema de 5 barras com 12 medidas.

Para a Figura 3.4, considera-se a seguinte simbologia:

o : medida da magnitude de tensão;

x : medida dos fluxos ativo e reativo.

O procedimento executado é apresentado a seguir. Considerando a magnitude da tensão V_1 medida e o ângulo da barra 1, δ_1 igual a zero, calcula-se:

- a magnitude da tensão V_2 utilizando o fluxo reativo medido, $U_1(1-2)$, e a magnitude da tensão V_1 , utilizando as equações (3.1), (3.2), (3.3);
- o ângulo da tensão δ_2 utilizando o fluxo ativo, $T_1(1-2)$, e o ângulo da tensão na barra 1, δ_1 , utilizando as equações (3.1), (3.2), (3.4).

Procedimento idêntico ao descrito acima é realizado em relação a barra 5.

A medida em que as tensões complexas nas barras são calculadas, os índices das barras já visitadas deverão ser armazenados em um vetor, para posterior utilização no procedimento

de busca. Neste vetor ficam armazenadas todas as barras que precisam ser consideradas na realização da busca na rede.

Considerando novamente a Figura 3.4, no momento que as tensões complexas na barra 2 e na barra 5 são calculadas, os índices destas 2 barras são armazenadas no vetor, indicando que a próxima barra considerada é a barra 2, seguida da barra 5 e assim sucessivamente.

O processo é repetido até que todas as barras sejam visitadas, garantindo com isso que todos os estados ou seja todos os módulos e ângulos de tensão sejam calculados.

No momento em que a tensão complexa em uma barra é calculada, as medidas de fluxo ativo e reativo em uma linha nela incidente são utilizadas. O conjunto de todas as linhas, cujas medidas foram utilizadas no cálculo das tensões complexas das barras formam uma árvore do sistema. A raiz desta árvore é a barra na qual o processo inicia. As linhas cujas medidas de fluxo ativo e reativo foram utilizadas são os ramos da árvore, e as barras cujas tensões complexas foram calculadas são os nós da árvore.

Para o exemplo da Figura 3.1, temos:

- raiz : nó 1;
- ramos : linhas 1, 2, 3, 4;
- nós : barras 1, 2, 3, 4, 5.

As linhas cujas medidas não foram utilizadas para o cálculo das tensões complexas das barras, são considerados elementos da co-árvore.

Para o exemplo da Figura 3.4, temos:

- co-árvore : linhas 5, 6, 7.

O algoritmo pode iniciar em qualquer barra onde a magnitude de tensão seja conhecida, isto é medida. Todas as barras devem ser alcançadas e conseqüentemente todos os estados serão calculados. É importante para tanto, que o plano de medição efetuado sobre a rede, garanta a observabilidade topológica da mesma [22] [23].

Durante o processo do cálculo dos estados, os fluxos de potência ativa e reativa, não medidos nas linhas são calculados, através das seguintes fórmulas (ver apêndice A):

a - Fluxo de Potência Ativa

$$P_{ij} = \frac{V_i V_j}{|Z|} \sin(\delta_{ij} - \theta_{ij}) + \frac{V_i^2}{|Z|} \sin(\theta_{ij}) \quad (3.5)$$

b - Fluxo de Potência Reativa

$$Q_{ij} = \frac{-V_i V_j}{|Z|} \cos(\delta_{ij} - \theta_{ij}) + V_i^2 \left(\frac{1}{|Z|} \cos \theta_{ij} - \frac{Y}{2} \right) \quad (3.6)$$

onde:

P_{ij} : fluxo de potência ativa da barra i para a barra j;

Q_{ij} : fluxo de potência reativa da barra i para a barra j;

V_i : magnitude de tensão na barra i;

V_j : magnitude de tensão na barra j;

$|Z|$: módulo da impedância na linha;

δ_{ij} : diferença angular entre a barra i e a barra j;

$$\theta_{ij}: \text{arc tg } \frac{-R}{X};$$

$Y=jB$: admitância da linha.

O cálculo dos fluxos de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão são realizados ou não, dependendo do plano de medição efetuado sobre a rede. Os fluxos ativos e reativos nas linhas podem ser medidos em um ou em ambos extremos das linhas. Pode ainda acontecer que nenhuma medida de fluxo ativo e/ou reativo seja efetuada sobre a linha.

No método proposto, todos os fluxos que não são medidos são calculados. Nas linhas onde os fluxos ativo e reativo são medidos em ambas as extremidades, os fluxos P_{ij} e Q_{ij} são calculados.

Em linhas onde não houver nenhuma medida de fluxo de potência, são calculados os fluxos em ambas extremidades da linha, ou seja P_{ij} , Q_{ij} , P_{ji} e Q_{ji} .

Todos os fluxos de potência ativa e reativa medidos que não participaram na realização do cálculo dos estados da rede, são utilizados nos testes de consistência.

Dependendo do plano de medição efetuado sobre a rede, os fluxos de potência ativa e reativa na linha são calculados considerando a lei das correntes de Kirchhoff e a lei das tensões de Kirchhoff.

Ocorrendo uma situação na qual todos os fluxos incidentes numa barra, com exceção de um deles, sejam conhecidos, através de medição ou de cálculos anteriores, e existe uma medida de injeção de potência ativa e reativa nesta barra, os fluxos desconhecidos da linha, podem ser calculados. Esta situação pode ser exemplificada através de uma parte da rede do sis-

tema IEEE-14 barras com o plano de medição mostrado na Figura 3.5 e que consiste no seguinte:

- magnitude de tensão medida : barra 1 e 4;
- fluxo ativo e reativo medido: linhas 1, 3 e 4;
- injeção de potência ativa e reativa: barra 2.

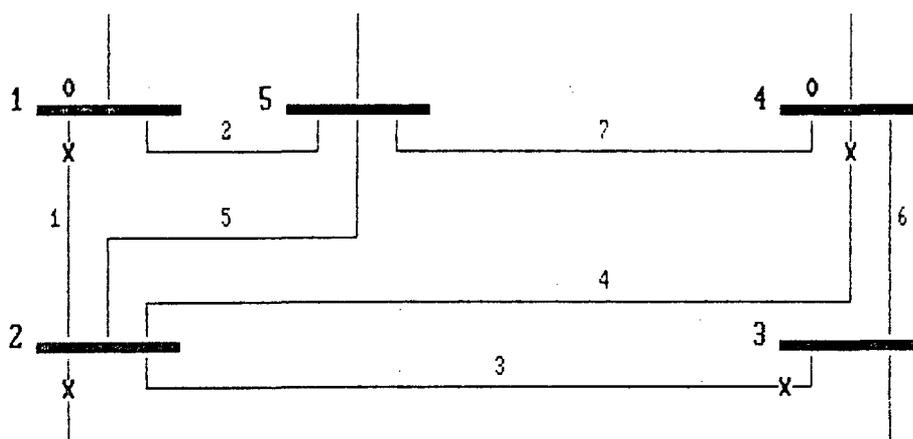


FIGURA 3.5 - Sistema 5 barras com 10 medidas.

Os fluxos de potência ativa $T5(2-5)$ e reativa $U5(2-5)$, são calculados considerando que o somatório dos fluxos ativo e reativo que saem da barra é igual ao somatório dos fluxos ativo e reativo que entram na barra.

Para a Figura 3.2:

$$T5(2-5) = P2 - [T1(2-1) + T3(2-3) + T4(2-4)]$$

$$U5(2-5) = Q2 - [U1(2-1) + U3(2-3) + U4(2-4)]$$

onde:

$T_{k(i-j)}$: fluxo de potência ativa na linha k fluindo da barra i para a barra j ;

$U_{k(i-j)}$: fluxo de potência reativa na linha k fluindo da barra i para a barra j ;

P_i : injeção de potência ativa na barra i ;

Q_i : injeção de potência reativa na barra i .

A partir da obtenção dos fluxos $T_{5(2-5)}$ e $U_{5(2-5)}$, é possível calcular o ângulo e a magnitude de tensão na barra 5. Os fluxos de potência ativa $T_{5(5-2)}$ e reativa $U_{5(5-2)}$, são calculados através das equações (3.5) e (3.6), respectivamente.

Simultaneamente ao desenvolvimento dos cálculos das tensões complexas, são realizados testes sobre a rede os quais permitem a validação das medidas efetuadas sobre a mesma. Estes testes são chamados testes de consistência e são abordados na seção seguinte.

3.2.3 - Testes de Consistência

Durante o processo do cálculo dos estados segundo o procedimento descrito na subseção anterior, verifica-se que muitas medidas realizadas sobre a rede não são utilizadas. Estas medidas são chamadas de medidas redundantes, e são justamente elas que permitem a realização dos testes de consistência. Na realidade o cálculo dos estados, exige apenas $(2N-1)$ medidas, sendo N o número de barras. Todas as medidas restantes são consideradas redundantes e utilizadas para a realização de testes de consistência. Tais testes baseiam-se em comparações entre o valor das medidas e os valores calculados das grandezas medidas. Se os valores absolutos das discrepâncias assim determinadas estiverem dentro de uma margem de tolerância especificada e definida em termos das propriedades estatísticas das medidas, considera-se que estas são corretas. Em caso contrário, suspeita-se que as mesmas sejam portadoras de erros grosseiros. A especificação para o cálculo da margem de tolerância será detalhada numa subseção própria. Os testes são realizados conforme o desenvolvimento dos cálculos, isto é, a medida que os resultados mediante o procedimento da seção 3.2.2 são obtidos.

Os testes baseiam-se nas leis de Kirchhoff para corrente e tensão e são os seguintes:

- testes de magnitude de tensão;
- testes baseados na lei de Kirchhoff para tensões, referidos de agora em diante como "testes LKT";
- Testes baseados na lei de Kirchhoff para correntes que serão referidos como "testes LKC".

3.2.3.1 - Testes de Magnitude de Tensão

O teste de magnitude de tensão é realizado através de uma comparação entre um valor medido de módulo de tensão e o valor calculado para esta grandeza. A validação é feita considerando-se apenas o módulo da tensão, pois os valores para os ângulos da tensão da barra não são medidos; conseqüentemente, não haveria sentido realizar testes neste tipo de grandeza.

O teste de magnitude de tensão somente será realizado quando houver medida da tensão na barra.

O procedimento adotado para a realização dos testes consiste em comparar os valores calculados para o módulo da tensão com os valores medidos. A diferença obtida é comparada com o valor da margem de tolerância admitida para este determinado teste.

Se a diferença entre os valores medido e calculado, chamada de discrepância, for menor que a tolerância, o resultado do teste é considerado BOM. Se a discrepância for maior que a tolerância, o teste é considerado RUIM.

Considerar o resultado do teste BOM significa que todas as medidas envolvidas nele, isto é, todas as medidas que participaram dos cálculos para a obtenção do valor calculado da magnitude de tensão na barra, são em princípio consideradas como isentas de erros grosseiros.

Considerar o resultado do teste RUIM, significa que pelo menos uma das medidas envolvidas no teste apresenta erro grosseiro.

Para ambos os resultados, BOM ou RUIM, é feita uma busca retroativa no grafo da árvore para identificar quais as medidas que participaram do teste.

Esta busca é um passeio de volta, através da árvore, percorrendo as linhas cujas medidas de fluxo de potência reativa contribuíram para a obtenção do resultado do módulo de tensão da barra. A busca cessa no momento em que for encontrada a barra cuja magnitude de tensão medida foi utilizada no início daquele cálculo.

Após a obtenção das medidas envolvidas no teste, cada uma dessas medidas recebe uma nota positiva ou negativa conforme o resultado do teste seja BOM ou RUIM.

Para o teste de tensão, só receberão nota as medidas de fluxo de potência reativa e magnitude de tensão, pois o cálculo da tensão complexa é realizado considerando-se apenas os acoplamentos potência ativa-ângulo de tensão de barra e potência reativa-módulo de tensão.

Novamente será utilizado uma parte do sistema IEEE-14 barras para exemplificar a ocorrência de um teste de tensão.

No exemplo da Figura 3.6 o teste de tensão é realizado na barra 4, onde a magnitude da tensão é medida. A barra 1 é a barra por onde o processo de busca no grafo da rede se inicia.

Com o valor do módulo da tensão medido e o fluxo reativo $U1(1-2)$, calcula-se o módulo da tensão na barra 2, $V2$. Utilizando $V2$ calculado (pois o módulo da tensão na barra 2 não é medido) e o fluxo de potência reativa medido $U4(2-4)$, calcula-se o módulo da tensão da barra 4, $V4$.

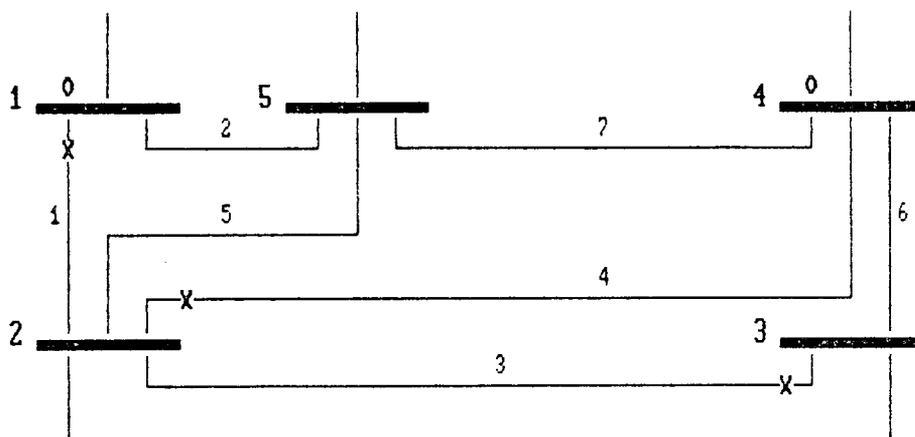


FIGURA 3.6 - Sistema de 5 barras com 8 medidas.

Supondo que a discrepância entre a magnitude da tensão calculada na barra 4 e a magnitude da tensão medida na barra 4, seja menor que a tolerância obtida para este teste, as medidas envolvidas no teste são supostas isentas de EGs, e o resultado do teste é considerado BOM.

MEDIDAS ENVOLVIDAS NO CÁLCULO DE V_4 :

- medidas de módulo de tensão : V_1 ;
- medidas de fluxo reativo : $U_1(1-2)$, $U_4(2-4)$.

MEDIDAS ENVOLVIDAS NO TESTE DE MAGNITUDE DE TENSÃO NA BARRA 4:

- medidas de módulo de tensão : V_1 , V_4 ;
- medidas de fluxo reativo : $U_1(1-2)$ e $U_4(2-4)$.

Cada uma das medidas acima recebe uma nota positiva (por exemplo +1) para o exemplo. A nota de cada medida é incrementada ou decrementada a cada teste até o final do processo, quando é feita uma avaliação geral.

Se o resultado do teste for considerado BOM, o valor medido da magnitude de tensão da barra será utilizado para dar continuidade ao processo de cálculo dos estados da rede.

Caso o resultado seja considerado RUIM, surge a necessidade de identificar se o teste falhou devido a existência de EG na medida de tensão, que está sendo testada, ou se a falha é devido a presença de EG nas medidas de fluxo de potência reativa.

É recomendado que, sempre que o módulo da tensão seja medido, o valor medido seja o utilizado na continuidade do cálculo [1]. A questão que então surge é que, se a medida da magnitude da tensão está incorreta e ela participa do cálculo da magnitude da tensão de outras barras adjacentes a ela, esse erro pode se propagar e também acusar erros em medidas isentas de EG (falso alarme).

Para solucionar este impasse, utiliza-se um teste de limites para o valor da tensão medida.

Admitindo-se que os erros de medida seguem uma distribuição normal, conforme mostra a Figura 3.7, sabe-se que os valores dos erros tem probabilidade de 99% de estar entre mais ou menos três desvios-padrão [17]. Este fato é utilizado para a definição dos limites superior e inferior para as medidas de módulo de tensão.

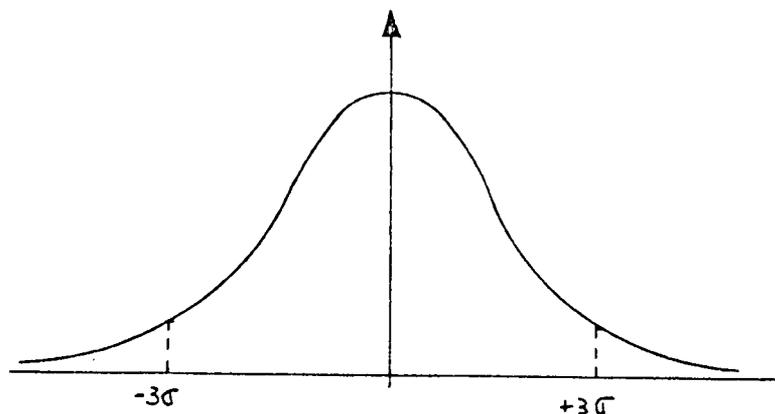


FIGURA 3.7 - Distribuição de probabilidade dos erros de medidas.

Portanto, os valores limites são:

$$- \text{ LIMITE INFERIOR : } MVI = MVR - 3.0 \sigma \quad (3.7)$$

$$- \text{ LIMITE SUPERIOR : } MVS = MVR + 3.0 \sigma \quad (3.8)$$

onde:

MVI : valor mínimo da magnitude de tensão aceitável como isento de EG para a magnitude de tensão medida;

MVS : valor máximo da magnitude de tensão aceitável como isento de EG para a magnitude de tensão;

MVR : valor real da magnitude de tensão obtido através de um programa previsor de carga;

σ : desvio padrão da medida.

Se a tensão medida estiver entre estes limites, toma-se este valor para dar continuidade aos cálculos, mesmo que esta medida tenha recebido nota negativa devido a falha no teste.

Se a magnitude da tensão medida não pertencer ao intervalo (MVI, MVS), verifica-se se a magnitude da tensão calcu-

lada encontra-se entre estes limites. Caso isto aconteça, considera-se o valor da magnitude da tensão calculada para dar continuidade ao processo de cálculo. Finalmente se o módulo da tensão calculada também não pertencer ao intervalo (MVI,MVS), assume-se que a magnitude de tensão da barra é 1 pu e dá-se prosseguimento ao cálculo.

3.2.3.2 - TESTES LKT

Este tipo de teste de consistência é realizado mediante a aplicação da lei de Kirchhoff das tensões, segundo a qual a soma das quedas de tensão em um laço é igual a zero.

As medidas que participam deste teste são as medidas efetuadas sobre as linhas pertencentes à co-árvore do sistema, ou seja, são medidas de fluxo de potência ativa e reativa nas linhas que não participaram no cálculo das tensões complexas da rede.

Durante o processo do cálculo dos estados pode surgir uma situação na qual, para uma determinada linha, os fluxos de potência ativa e reativa são medidos e as tensões complexas em ambas as extremidades na linha já estão calculadas.

Através das equações (3.5) e (3.6), os fluxos de potência ativa e reativa na linha são calculados e comparados, com os valores dos fluxos de potência ativa e reativa medidos para a linha.

Se a diferença obtida entre os valores medido e calculado forem menores que o valor da tolerância especificada para este determinado tipo de teste, diz-se que o resultado do teste é BOM, isto é as medidas envolvidas no teste e que estão dis-

postas segundo um laço da rede que inclui a linha i - j pertencente a co-árvore são isentas de EGs.

Se a discrepância entre os valores medido e calculado for maior que a margem de tolerância calculada, o resultado do teste é considerado RUIM, e suspeita-se que pelo menos uma das medidas envolvidas no teste é portadora de EG.

Os testes são realizados considerando separadamente medidas de fluxo de potência ativa e medidas de fluxo de potência reativa.

Após a realização dos testes ativo e reativo, é feita uma busca retroativa na árvore do sistema, para identificar quais as medidas que participaram no cálculo dos fluxos de potência na linha.

Considerando primeiramente o teste LKT para medidas de fluxo ativo, o procedimento é o seguinte, a saber:

Suponha que o teste esteja sendo realizado na linha "1", cujas barras terminais são a barra "i" e barra "j".

A partir da barra "i", é feita uma busca retroativa através do grafo da rede até a barra por onde o processo de cálculo inicia, ou seja até a barra de referência cujo valor do ângulo é zero graus. Neste caminho de retorno à barra de origem, são armazenadas todas as medidas que participaram do cálculo do ângulo da barra "i", sejam elas medidas de fluxo ativo ou medidas de injeção de potência ativa. Procedimento idêntico é realizado em relação a barra "j".

A partir da obtenção dos dois caminhos que levaram ao cálculo dos ângulos de tensão nas barras "i" e "j", e consequentemente ao cálculo do fluxo de potência ativa na linha "1", é feita uma interseção entre estes dois percursos. Apenas recebe-

rão nota +1 ou -1, conforme o resultado do teste, as medidas que NÃO pertençam à interseção entre os dois percursos. Esta restrição decorre das razões expostas a seguir.

O fluxo de potência ativa numa linha está diretamente ligado à diferença angular existente entre as duas barras: a barra de origem e a barra de final de linha. Sendo assim, um erro grosseiro numa medida de fluxo ativo pode ficar mascarado, isto é não detectável, caso os caminhos percorridos para se alcançar as barras de origem e final da linha, tenham medidas comuns a ambos os percursos.

Para demonstração do procedimento, considera-se o sistema IEEE-14 barras, conforme plano de medição identificado na Figura 3.8:

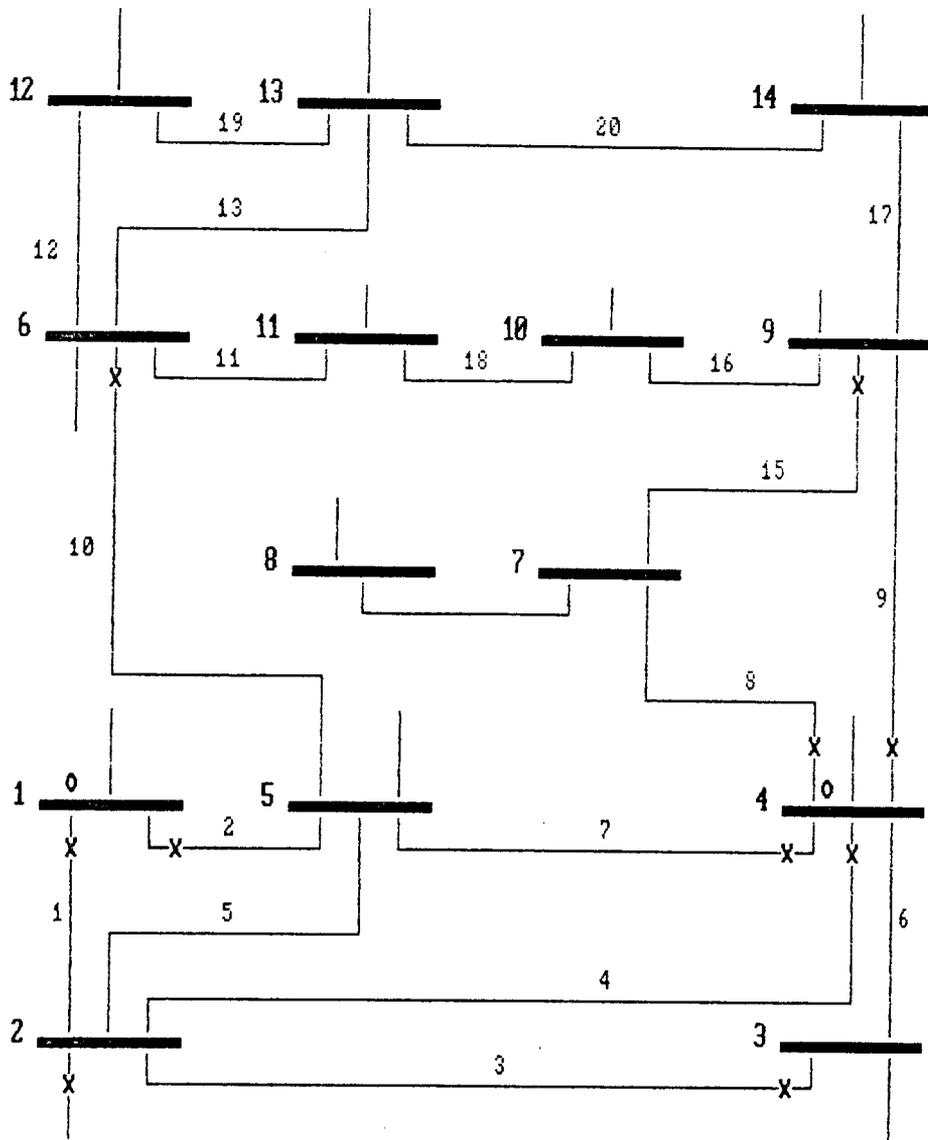


FIGURA 3.8 - Sistema IEEE 14 barras com 24 medidas.

Observa-se que o plano de medição considerado foi identificado somente nas linhas necessárias à demonstração.

A ausência de injeção na barra 7 conta como duas medidas: injeção de potência ativa e injeção de potência reativa.

No teste LKT ATIVO na linha 7(4-5) há dois conjuntos de medidas envolvidas no cálculo do fluxo ativo $T7(4-5)$ e são:

- CONJUNTO 1 - medidas envolvidas no cálculo de $\delta 4$:
T1(1-2), T4(4-2)
- CONJUNTO 2 - medidas envolvidas no cálculo de $\delta 5$:
T2(1-5)

A interseção entre estes dois conjuntos é o conjunto vazio.

Portanto para o teste LKT ATIVO na linha 7(4-5), as medidas T1(1-2), T4(4-2), e T2(1-5) recebem nota, positiva ou negativa conforme o resultado do teste.

Considerando novamente a Figura 3.8, será analisado o teste LKT ATIVO na linha 15(9-7).

É feita uma busca no grafo da árvore da barra 7 até a barra 1 (barra de origem) e da barra 9 até a barra 1.

Os dois conjuntos de medidas envolvidas são:

- medidas envolvidas no cálculo de $\delta 7$: T1(1-2),
T4(4-2), T8(4-7)
- medidas envolvidas no cálculo de $\delta 9$: T1(1-2),
T4(4-2), T9(4-9)

A interseção entre estes dois conjuntos são as medidas T1(1-2) e T4(4-2). Estas medidas, embora participantes no cálculo do fluxo de potência ativa na linha 15(9-7), não recebem nota no teste, pois um EG em qualquer uma destas medidas não altera o resultado do teste.

As medidas T8(4-7) e T9(4-9) recebem nota positiva ou negativa conforme resultado do mesmo.

Com relação aos exemplos anteriores, os fluxos de potência ativa calculados na linha, foram todos obtidos através da equação (3.5).

Pode ocorrer que o fluxo em uma ou mais linhas seja calculado pela aplicação da Lei de Kirchhoff das correntes aplicada a uma barra do sistema. Neste caso, todas as medidas envolvidas neste cálculo recebem nota positiva ou negativa dependendo do resultado do teste.

Para exemplificar utilizaremos o sistema IEEE-14 barras com o plano de medição conforme mostra a Figura 3.9.

A linha onde o teste LKT ATIVO é realizado é a linha 18.

O procedimento é idêntico ao relatado anteriormente, ou seja é efetuada uma busca da barra 10 até a barra 1 e da barra 11 até a barra 1, sendo então determinados os dois conjuntos:

- CONJUNTO 1 - medidas envolvidas no cálculo de 10 :
T1(1-2), T4(4-2), T9(9-4), T16(9-10);
- CONJUNTO 2 - medidas envolvidas no cálculo de 11 :
T1(1-2), T3(3-2), T4(4-2), P2, T10(6-5)
e T11(11-6).

Observa-se no exemplo que, ao se fazer a busca na árvore entre a barra 11 e a barra 1, as linhas envolvidas são a linha 1, a linha 5, a linha 10 e a linha 11, entretanto para o plano de medição considerado, a linha 5 pertencente a árvore, não é medida em nenhuma de suas extremidades. A obtenção do fluxo ativo T5(2-5) é feita através da soma algébrica da injeção de potência ativa medida na barra 2, e dos fluxos de potência incidentes na barra 2. Isto é possível porque somente o fluxo

T5(2-5) não é conhecido, sendo todos os outros fluxos incidentes na barra 2 medidos ou calculados anteriormente.

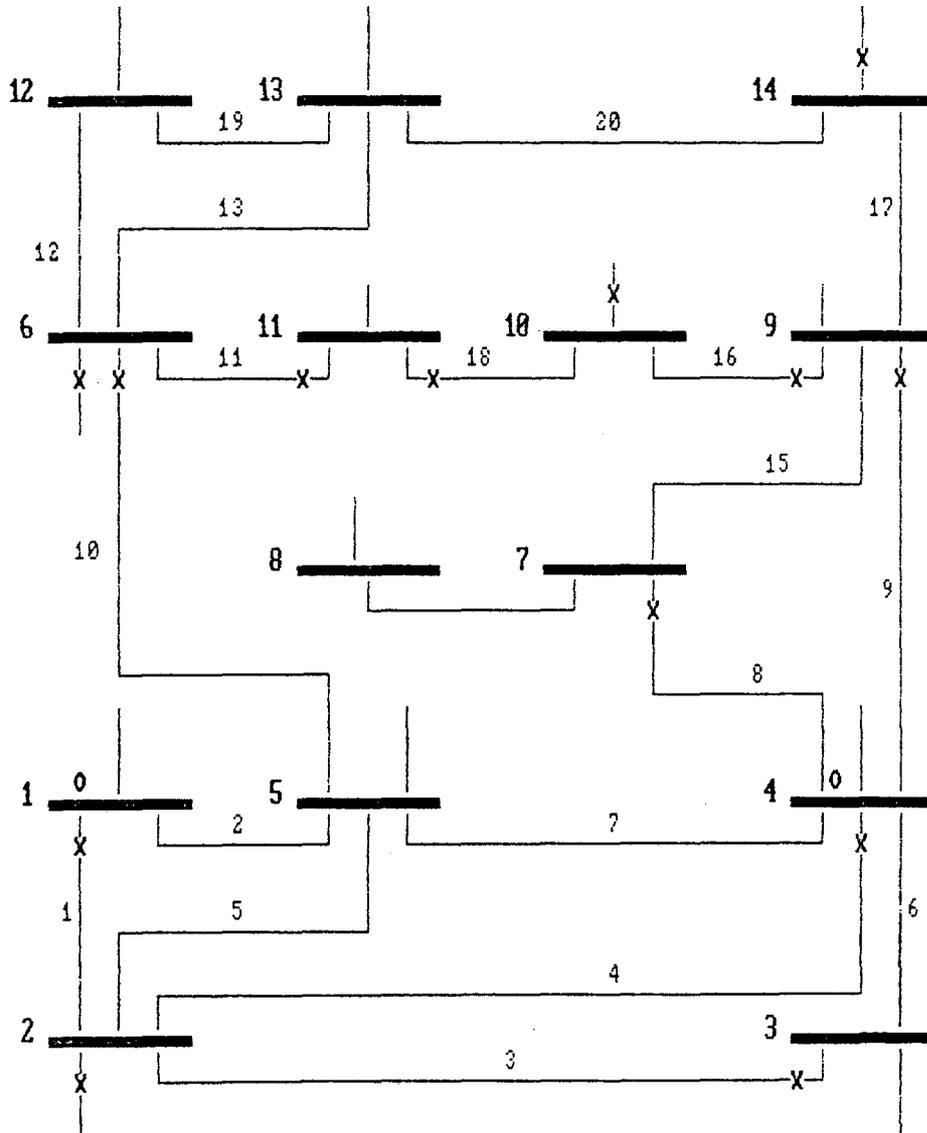


FIGURA 3.9 - Sistema IEEE 14 barras com 30 medidas.

Para casos como esse, todas as medidas envolvidas no teste recebem nota, mesmo as medidas pertencentes à interseção entre os dois conjuntos.

É importante salientar que em todos os testes, uma mesma medida recebe nota apenas uma vez, independentemente do

grau de sua participação nos cálculos. Para o exemplo, a medida de fluxo T1(1-2) participa no cálculo de δ_{10} e participa duplamente no cálculo de δ_{11} , isto é diretamente no cálculo de δ_2 e indiretamente no cálculo de δ_5 . Apesar disso, o fluxo ativo medido T1(1-2) recebe nota apenas uma vez.

Para o teste LKT REATIVO, o procedimento inicial é idêntico ao efetuado para o teste LKT ATIVO. A busca no grafo da rede para identificação das medidas envolvidas no teste LKT REATIVO é similar a realizada para o caso do teste LKT ATIVO. A diferença é que a busca cessa no momento em que é encontrada uma barra cuja magnitude de tensão é medida e esta medida de tensão não é suspeita de conter EG.

Neste tipo de teste recebem nota as medidas de magnitude de tensão, medidas de fluxo de potência reativa e medidas de injeção de potência reativa.

Tomando para exemplo o teste LKT REATIVO realizado na linha 18, para o plano de medição mostrado na Figura 3.9, o resultado do teste é o seguinte:

MEDIDAS ENVOLVIDAS NO CÁLCULO DE V11 :

- medidas de fluxo reativo: U1(1-2), U3(3-2), U4(4-2),
U10(6-5), U11(11-6);
- medidas de tensão : V1;
- medidas de injeção de potência reativa: Q2.

Observa-se no exemplo que a busca retroativa no grafo da árvore parou na barra 1, pois esta é a única barra cuja magnitude de tensão é medida no caminho encontrado.

MEDIDAS ENVOLVIDAS NO CÁLCULO DE V10 :

- medidas de fluxo reativo : U9(9-4), U16(9-10);
- medidas de tensão : V4.

Verifica-se, neste caso, que a busca no grafo da árvore cessa ao verificar que a magnitude de tensão V4 é medida e que esta não é suspeita de conter EG.

Em relação ao sistema IEEE-14 barras da Figura 3.9, a realização de um teste LKT REATIVO na linha 18(11-10), supondo que magnitude de tensão fosse medida tanto na barra 10 quanto na barra 11, as medidas que recebem nota no teste, considerando que V10 e V11 são isentas de EGs são:

- medida de fluxo reativo : U18(11-10);
- medida de magnitude de tensão : V10 , V11.

Considera-se, para efeito deste teste, que o cálculo do fluxo reativo na linha 18 entre a barra 11 e a barra 10, é função exclusiva da magnitude de tensão da barra 10 e da barra 11, isto é, neste cálculo não foram levados em conta os valores dos ângulos de fase das tensões. Foi feito com isto uma simplificação, pois é sabido que existe uma dependência, embora pequena, do ângulo de tensão entre as barras, e o fluxo reativo na linha.

Se a medida de tensão V10 é suspeita de conter EG, é necessário promover uma busca retroativa na árvore, até encontrar uma barra cuja magnitude de tensão é medida e isenta de conter erro grosseiro. O procedimento é idêntico se a medida de tensão V11 é suspeita de conter EG.

Pode acontecer, como foi observado em alguns exemplos, que embora as magnitudes de tensão sejam corretas, o fluxo de potência reativa calculado na linha, comparado com o valor do fluxo medido, apresenta discrepância maior que o valor da tolerância obtida para o teste. Este fato se deve a existência de erro grosseiro em medidas de fluxo de potência ativa, o qual se reflete em cálculos errados para o ângulo de tensão da barra. A ocorrência deste problema está ligada ao tipo de configuração da rede e ao plano de medição efetuado sobre a mesma. Observando os sistemas testados, o número de vezes que se detectou este fato foi pequeno, não invalidando de forma alguma a consideração feita baseada no desacoplamento entre os pares potência ativa-ângulo de tensão de barra e potência reativa-magnitude de tensão de barra.

3.2.3.3 - TESTES LKC

Este teste de consistência é fundamentado na lei de Kirchhoff para correntes, a qual diz que o somatório das correntes que convergem para um nó é igual ao somatório das correntes que divergem do nó.

O teste LKC é realizado nas barras onde as injeções de potência ativa e reativa são medidas, e não foram utilizadas nos cálculos das tensões complexas das barras, isto é, são redundantes. O processo consiste em verificar se o somatório dos fluxos de potência incidentes em uma barra, medidos ou calculados, não apresenta discrepância significativa com a medida de injeção de fluxo de potência efetuada sobre a barra. Os testes são feitos separadamente para fluxos ativo e fluxos reativo.

Se a discrepância existente entre a medida de injeção e o somatório dos fluxos de potência for menor que o valor da tolerância obtida para o teste, o resultado deste é considerado BOM, e todas as medidas envolvidas no teste recebem a nota +1. Em caso contrário, o resultado do teste é considerado RUIM, e as medidas participantes recebem nota -1.

Após a realização do teste, é importante identificar as medidas participantes do mesmo. Nesta etapa do processo, verifica-se que os valores dos fluxos de potência na linha participante do teste podem ser medidos ou calculados. Para os fluxos medidos na extremidade considerada, é atribuída uma nota +1 ou -1, conforme o resultado obtido para o teste. Nas linhas onde fluxo é calculado, é feita uma busca retroativa no grafo da árvore, para se obter as medidas participantes deste cálculo. Esta busca assume aspectos distintos quando o teste for realizado em relação a fluxo de potência ativa ou em relação a fluxo de potência reativa da rede.

Em relação ao teste LKC ATIVO, o procedimento efetuado é o seguinte:

Para cada linha incidente na barra cujo fluxo não é medido na extremidade considerada, é feita uma busca retroativa no grafo da árvore, até a barra de referência. Nesta busca são armazenadas em um vetor todas as medidas de fluxo ativo ou medidas de injeção de potência ativa que participaram do cálculo do fluxo de potência ativa na extremidade considerada da linha.

Para exemplificar o procedimento descrito acima, observe a Figura 3.10, cuja injeção de potência ativa é medida na barra "j", e as linhas conectadas a mesma são as linhas $1(i-j)$, $2(j-1)$ e $3(m-j)$.

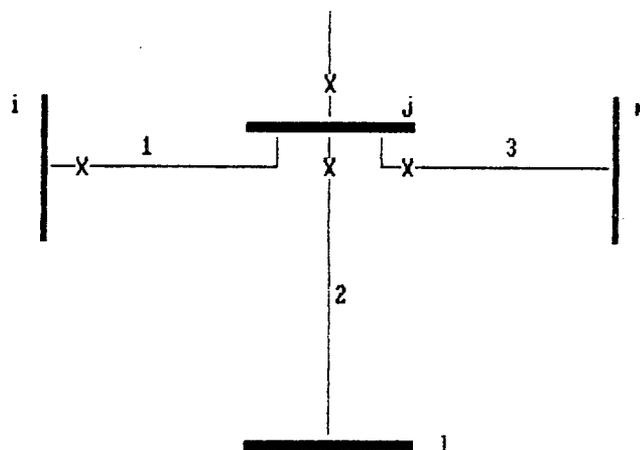


FIGURA 3.10 - Sistema de 4 barras.

O teste LKC ATIVO na barra "j" é efetuado verificando se a diferença entre a injeção de potência ativa medida P_j , e o somatório dos fluxos ativos $T_1(j-i)$, $T_2(j-1)$, e $T_3(j-m)$, é menor ou igual ao valor da tolerância calculada para o teste, conforme é mostrado na equação:

$$| P_j - [T_1(j-i) + T_2(j-1) + T_3(j-m)] | \leq \text{TOL} \quad (3.9)$$

Nota-se para o exemplo, que os fluxos nas linhas 2 e 3 são medidos de "j" para "1", e de "j" para "m" respectivamente. Portanto estas duas medidas de fluxo $T_2(j-1)$ e $T_3(j-m)$ recebem nota positiva ou negativa dependendo do resultado do teste.

Com relação a linha 1, o fluxo medido é o fluxo de potência ativa $T_1(i-j)$. O fluxo utilizado no teste é o fluxo de potência ativa calculado de "j" para "i", $T_1(j-i)$. O valor de $T_1(j-i)$, por sua vez depende dos fluxos ativos medidos encontrados entre a barra de referência e a barra "j". Surge daí a

necessidade de se obter as medidas de fluxo e/ou de injeção de potência ativa da barra "j", até a barra de referência.

Para exemplificar, considera-se o sistema IEEE-14 barras, para o plano de medição apresentado na Figura 3.11.

Observar que a Figura 3.11 apresenta apenas uma parte do plano de medição, com a finalidade de exemplificar o item em questão.

O teste LKC ATIVO é realizado na barra 4, já que a medida de injeção de potência ativa não foi utilizada na obtenção do fluxo ativo em nenhuma das linhas conectadas a mesma, sendo portanto redundante.

O teste consiste em verificar se a diferença entre a medida de injeção de potência ativa P_4 , e o somatório dos fluxos nas linhas 4,6,7,8,9 é menor ou igual a tolerância obtida para o teste.

Aplicando (3.9) obtém-se:

$$| P_4 - (T_{4-2} + T_{4-3} + T_{4-5} + T_{4-7} + T_{4-9}) | \leq TOL \quad (3.10)$$

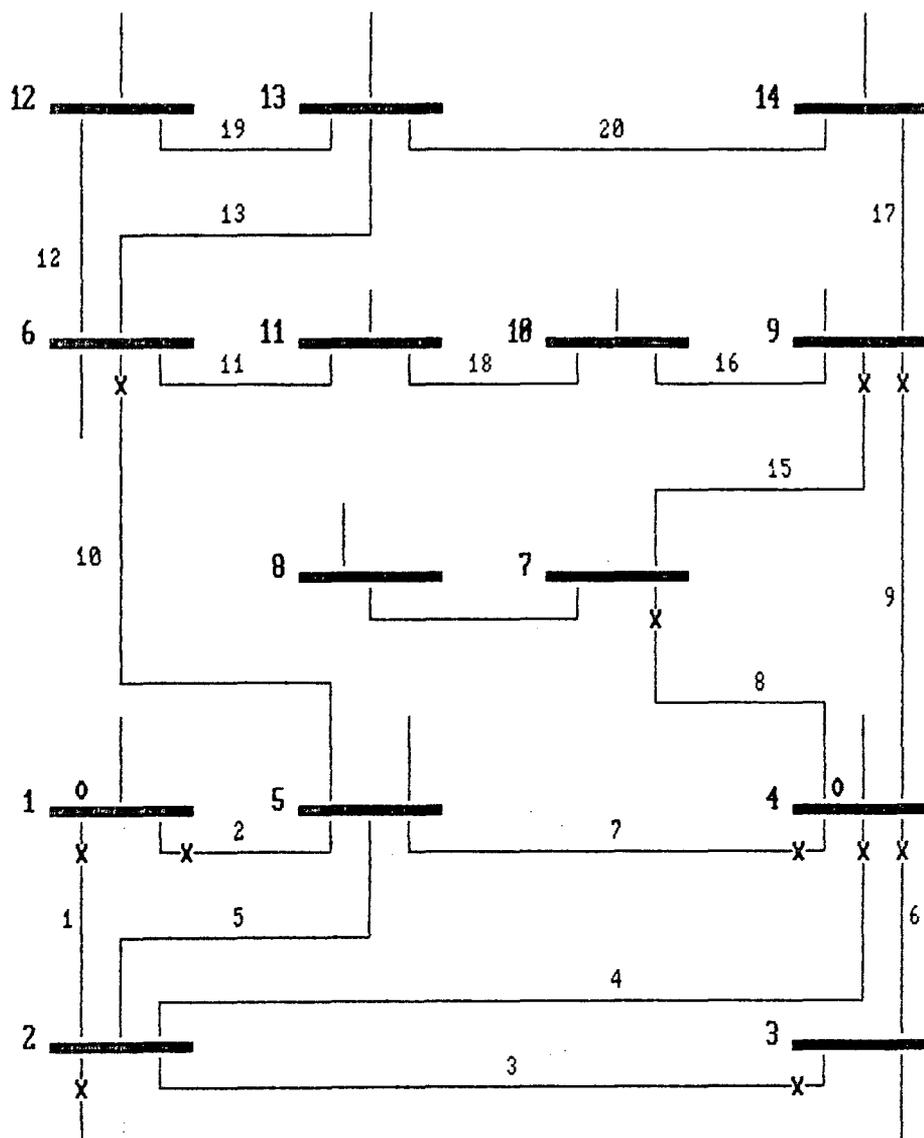


FIGURA 3.11 - Sistemas IEEE 14 barras com 26 medidas.

Se a relação (3.10) for verdadeira, o resultado do teste é considerado BOM, e as medidas recebem nota +1. Em caso contrário, o resultado do mesmo é considerado RUIM, e as medidas envolvidas no teste recebem nota -1.

Torna-se necessário portanto, identificar quais são as medidas que efetivamente participaram do teste. Na Figura 3.11 observa-se que nas linhas 4, 6 e 7, os fluxos medidos são T4(4-

2), T6(4-3), T5(4-5), respectivamente. A estes fluxos é atribuída uma nota +1 ou -1, conforme o resultado do teste.

As linhas 8 e 9, apresentam fluxos medidos T8(7-4) e T9(9-4) respectivamente. É necessário neste caso investigar que medidas participaram no cálculo do fluxo T8(4-7) e T9(4-9), pois foram estes os utilizados no teste.

Para isto, primeiramente é feita uma busca no grafo da árvore desde a barra 7 até a barra 1, que é a barra de referência onde $\delta_1=0$. Nesta busca, são encontradas as medidas que participaram na obtenção do fluxo T8(4-7). São elas: T1(1-2), T4(4-2) e T8(7-4).

O mesmo procedimento é efetuado em relação a barra 9, e as medidas encontradas são T1(1-2), T4(4-2) e T9(9-4).

Após a identificação do conjunto de medidas envolvidas na obtenção dos fluxos de potência ativa não-medidos, é necessário determinar a interseção entre os subconjuntos deste conjunto cujos elementos estão associados a diferentes fluxos de potência não-medidos. Isto é importante porque só receberão nota as medidas que não pertencem à interseção entre estes subconjuntos.

Para o exemplo do teste LKC ATIVO na barra 4, mostrado na Figura 3.8, as medidas de fluxo ativo T1(1-2) e T4(4-2), participam do cálculo do fluxo de potência ativa tanto na linha 8(4-7), quanto na linha 9(4-9). Portanto a estas medidas não é atribuída nenhuma nota. A razão para isto é que a incidência de EG em qualquer uma destas medidas, é mascarada, isto é, não é possível detectá-lo, pois há a possibilidade de ângulos de tensão de barras incorretos fornecerem resultados aceitáveis para fluxos de potência ativa calculados na linha. Isto pode ser

visto a partir da equação (3.5) que mostra que erros nos ângulos das barras aproximadamente iguais não afetarão significativamente o valor do fluxo de potência.

Portanto, só se assegura a detecção de erro grosseiro, se este estiver presente na medida $T8(7-4)$ ou $T9(9-4)$. Por isso apenas estas duas medidas recebem nota no teste LKC ATIVO na barra 4.

O procedimento não é o mesmo se porventura uma linha pertencente à árvore tiver um dos fluxos de potência ativa calculado utilizando o método LKC. Neste caso, um erro grosseiro numa medida de fluxo de potência ativa se propagaria pelo caminho. Por isso todas as medidas encontradas na busca, para cada linha cujo fluxo foi calculado, recebem nota +1 ou -1 conforme o resultado obtido para o teste.

Se a interseção de subconjuntos referida anteriormente for o conjunto vazio, isto é, se os caminhos seguidos na busca para cada medida de fluxo a ser identificada forem completamente distintos, todas as medidas encontradas receberão nota.

O cálculo do fluxo ativo na extremidade da linha conectada a uma barra na qual se realiza o teste ATIVO é feito através da equação (3.5).

Para exemplificar o procedimento descrito acima, considere a Figura 3.12.

Seja "l" a linha entre "i" e "j", cujo fluxo ativo calculado é o T_{ij} , conforme Figura 3.12.

O teste LKC ATIVO é realizado na barra "i".

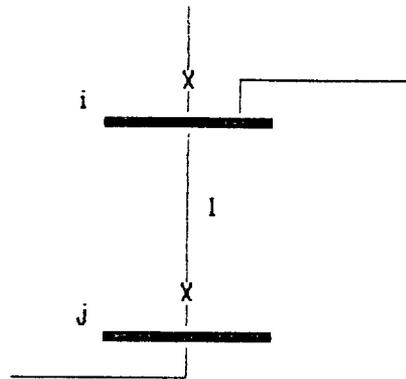


FIGURA 3.12 - Sistema de 2 barras.

É necessário o cálculo do fluxo ativo na linha "l", terminal "i", já que o mesmo não é medido.

No cálculo de T_{ij} , são envolvidos as grandezas:

T_{ji} : fluxo de potência ativa da barra "j" para a barra "i";

δ_i : ângulo da tensão da barra "i";

δ_j : ângulo da tensão da barra "j".

Na busca efetuada sobre a árvore, são obtidas as medidas envolvidas na obtenção de δ_i e δ_j .

Se no caminho entre a barra "i" e a barra de referência houver uma medida de fluxo de potência ativa portadora de EG, o ângulo δ_i apresentará um valor incorreto. Se esta mesma medida errônea participar do cálculo do ângulo δ_j , este valor também estará incorreto, porém o fluxo de potência ativa calculado entre a barra "i" e a barra "j" provavelmente estará correto, não sendo desta forma detectado. Caso contrário, isto é a medida de fluxo de potência ativa errônea não participa do cálculo do ângulo δ_j , este apresentará o valor correto, porém o

fluxo de potência ativa calculado entre a barra "i" e "j" estará incorreto (para o exemplo supõe-se que o fluxo de potência ativa T_{ji} , seja correto), sendo desta forma detectado.

Para o teste LKC REATIVO, o procedimento é similar ao acima descrito para o teste de potência ativa. A diferença é que, na busca realizada sobre o grafo da rede, o percurso é interrompido quando uma magnitude de tensão for encontrada.

Novamente, salienta-se que uma medida recebe apenas uma nota em cada teste que participa, mesmo que sua participação ocorra no cálculo de vários fluxos.

3.2.4 - Cálculo das Margens de Tolerância

Quando um teste de consistência é realizado, o problema é decidir quais dentre as medidas envolvidas, são corretas, e quais as que contêm erro grosseiro de medição. Para tanto é necessário a obtenção de um valor que represente o limiar para o que pode ser considerado erro normal inerente ao sistema de medição [8]. Este valor é denominado margem de tolerância.

Cada teste de consistência realizado consiste em comparar o valor da discrepância (por exemplo a soma algébrica dos fluxos de potência em uma barra) com a margem de tolerância calculada para este teste. Se a margem de tolerância é ultrapassada, o resultado do teste é considerado RUIM.

As margens de tolerância são calculadas através das tolerâncias individuais de cada medida. As margens de tolerância das grandezas medidas, por sua vez, dependem da precisão dos instrumentos utilizados. São uma combinação das precisões dos

transformadores de medida, dos transdutores e dos conversores analógico-digitais.

Os valores típicos utilizados para as precisões são [1] [29]:

- medidores de magnitude de tensão : 0.1 %;
- medidores de fluxo ativo : 2.0 %;
- medidores de fluxo reativo : 2.0 %.

O cálculo das margens de tolerância é realizado sistematicamente durante o processo do cálculo dos estados. A medida que uma tensão é calculada, a margem de tolerância associada a este cálculo de tensão é efetuada. O mesmo ocorre para as medidas de fluxo de potência na linha.

Os valores das margens de tolerância individuais calculados são armazenados para serem utilizados quando necessário, isto é, no cálculo da margem de tolerância para cada tipo de teste.

3.2.4.1 - Cálculo da margem de tolerância para tensões complexas calculadas

A margem de tolerância para a queda de tensão em uma linha é calculada através da margem de tolerância do fluxo de potência medido na respectiva linha.

A relação definida pela matriz Jacobiana pode ser usada: [1] [7]

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_{ij} \\ \Delta V_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial\delta}{\partial P} & \frac{\partial\delta}{\partial Q} \\ \frac{\partial V}{\partial P} & \frac{\partial V}{\partial Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{ij} \\ \Delta Q_{ij} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

onde:

$\Delta\delta_{ij}$: tolerância para o ângulo de tensão entre a barra i e a barra j;

ΔV_{ij} : tolerância para a diferença entre as magnitudes de tensão entre a barra i e a barra j;

ΔP_{ij} : tolerância para fluxo de potência ativa na linha;

ΔQ_{ij} : tolerância para fluxo de potência reativa na linha.

As derivadas parciais são apresentadas no Apêndice B.

É feita uma simplificação na equação (3.11), assumindo o modelo desacoplado, no qual os elementos fora da diagonal principal são considerados desprezíveis face os valores dos elementos diagonais. Considera-se o fato das sensibilidades $\partial\delta/\partial P$ e $\partial V/\partial Q$ serem de maior magnitude que as sensibilidades $\partial\delta/\partial Q$ e $\partial V/\partial P$ [7] [13]. Este tipo de relação em geral é verificada para redes de transmissão em extra-alta tensão (EAT 230 kV) [11].

Portanto, para o cálculo das margens de tolerância para as tensões complexas na rede têm-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_{ij} \\ \Delta V_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \delta}{\partial P} & 0 \\ 0 & \frac{\partial V}{\partial Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{ij} \\ \Delta Q_{ij} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

A margem de tolerância para as tensões nas barras é calculada com relação à barra de referência, isto é, a raiz da árvore. O valor das tolerâncias para os fluxos ativo ΔP_{ij} e reativo ΔQ_{ij} são calculados de maneira distinta, dependendo se os fluxos utilizados no cálculo das tensões complexas, e consequentemente no cálculo das tolerâncias $\Delta \delta_{ij}$ e ΔV_{ij} , são medidos ou calculados.

Se os fluxos utilizados são medidos, os valores para as tolerâncias de ΔP_{ij} e ΔQ_{ij} são calculados a partir das equações abaixo:

$$\Delta P_{ij} = 3 \cdot \text{TOLT} \cdot \text{MTR} \quad (3.13)$$

$$\Delta Q_{ij} = 3 \cdot \text{TOLU} \cdot \text{MUR} \quad (3.14)$$

onde:

- ΔP_{ij} : tolerância para fluxo de potência ativa;
- TOLT : precisão do medidor de fluxo de potência ativa;
- MTR : valor real do fluxo de potência ativa na linha, obtido através de um programa previsor de carga;
- ΔQ_{ij} : tolerância para fluxo de potência reativa;
- TOLU : precisão do medidor de fluxo de potência reativa;

MUR : valor real do fluxo de potência reativa na linha obtido através de um programa previsor de carga.

O fator 3 (três) que aparece nas equações (3.13) e (3.14), indica que se admite desvios de até três desvios-padrão em uma medida, sem que isso se constitua em EG.

Sempre que os fluxos de potência são calculados, os valores para ΔP_{ij} e ΔQ_{ij} também o são. A maneira como é efetuado este cálculo será detalhada adiante.

Após a obtenção da tolerância para a queda de tensão complexa na linha (ângulo e módulo) é possível obter a tolerância para o valor calculado do módulo de tensão da barra e para o ângulo de tensão da barra, pois:

$$\Delta \delta_{ij} = \Delta \delta_i - \Delta \delta_j \quad (3.15)$$

$$\Delta V_{ij} = \Delta V_i - \Delta V_j \quad (3.16)$$

onde:

δ_{ij} : variação da abertura angular entre a barra "i" e a barra "j";

δ_i : ângulo de tensão na barra "i";

δ_j : ângulo de tensão na barra "j";

V_{ij} : queda da magnitude de tensão entre a barra "i" e a barra "j";

V_i : magnitude de tensão na barra "i";

V_j : magnitude de tensão na barra "j";

Pelo processo do cálculo dos estados, a tolerância para o ângulo e magnitude da tensão em uma das barras sempre será conhecida, permitindo através das equações (3.17) e (3.18) o cálculo para a barra cuja tolerância é desconhecida.

A margem de tolerância para a soma de várias quantidades medidas ou calculadas, é obtida pela aplicação do seguinte resultado da teoria das Probabilidades [17]:

" A variância da soma de variáveis aleatórias independentes, é igual a soma das respectivas variâncias ".

Portanto, para a obtenção da tolerância para o ângulo de tensão na barra "j" e da tolerância para a magnitude de tensão na barra "j", faz-se:

$$\Delta\delta_j = \sqrt{(\Delta\delta_{ij})^2 + (\Delta\delta_i)^2} \quad (3.17)$$

$$\Delta V_j = \sqrt{(\Delta V_{ij})^2 + (\Delta V_i)^2} \quad (3.18)$$

No início do processo é importante arbitrar o valor da tolerância para o ângulo de tensão na barra.

A tolerância para a magnitude da tensão na barra de origem é calculada considerando-se que os ruídos normais, inerentes ao sistema de medição, muito raramente excedem a três (3.0) desvios-padrão, ao passo que os erros grosseiros podem apresentar amplitudes de algumas dezenas de desvios-padrão.

Isto posto, o valor da tolerância da magnitude de tensão na barra de referência é:

$$\Delta V_{BA1} = 3 \quad TOLV \quad MVR(BA1) \quad (3.19)$$

onde:

$\Delta VBA1$: tolerância para a magnitude de tensão na barra de referência;

$BA1$: barra de referência;

$TOLV$: tolerância para a magnitude de tensão medida, obtida em função da precisão dos instrumentos de medição;

$MVR(BA1)$: valor real da magnitude de tensão na barra de referência, obtida através de um programa previsor de carga.

3.2.4.2 - Cálculo da margem de tolerância para fluxos de potência ativa e reativa calculados

O cálculo da margem de tolerância para os fluxos de potência calculados difere conforme o procedimento usado para o cálculo destes fluxos.

Se os fluxos de potência ativa e reativa na linha foram calculados utilizando o método LKC, isto significa que houve um somatório de fluxos em uma barra. Conseqüentemente, a margem de tolerância para estes fluxos é calculada segundo o resultado da Teoria de Probabilidades enunciada anteriormente.

Como a margem de tolerância é proporcional ao desvio padrão, a seguinte relação é usada:

$$Ts = \sqrt{\sum T_i^2} \quad (3.20)$$

onde:

T_s : margem de tolerância para a soma de várias quantidades;

T_i : margem de tolerância para cada termo.

Para exemplificar, toma-se a Figura 3.13.

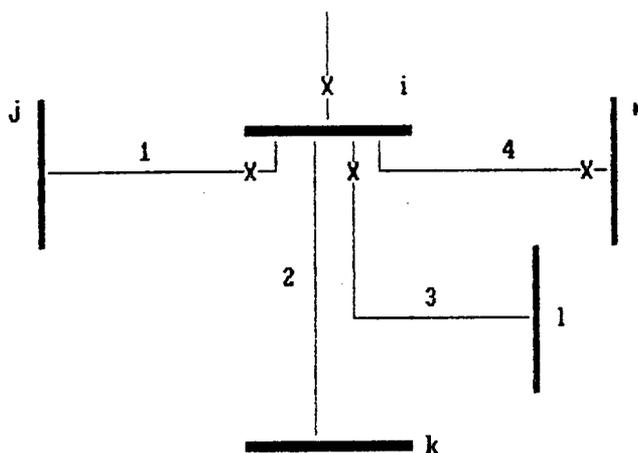


FIGURA 3.13 - Sistema de 5 barras.

Supõe-se que o fluxo na linha 2 da barra "i" para a barra "k" seja calculado por LKC.

Para exemplificar toma-se o cálculo da tolerância para o fluxo calculado de potência ativa. Para o cálculo da tolerância para o fluxo de potência reativa o procedimento é idêntico.

O cálculo do fluxo de potência ativa na linha 2 entre a barra "i" e a barra "k" é o resultado da soma algébrica dos fluxos na barra "i" e injeção de potência ativa na barra "i". Conseqüentemente, o valor da tolerância para este fluxo calculado é função das tolerâncias de cada fluxo participante do cálculo .

Nas linhas 1 e 3, o fluxo utilizado no cálculo é o valor medido. Portanto a tolerância para estes fluxos é

$$T1 = 3 \text{ TOLT MTR1} \quad (3.21)$$

$$T3 = 3 \text{ TOLT MTR3} \quad (3.22)$$

onde:

T1 : tolerância para fluxo medido na linha 1;
 TOLT : precisão dos medidores de potência ativa;
 MTR : fluxo de potência ativa obtido através de um histórico de previsão de carga na linha.

O fluxo de potência ativa na linha 4, entre a barra "i" e a barra "m" foi calculado. Consequentemente o valor da tolerância calculada T4 correspondente também se encontra disponível.

O valor da tolerância da medida de injeção é obtido da mesma forma que a tolerância para os fluxos de potência medidos, ou seja:

$$TP = 3 \text{ TOLP MPR} \quad (3.23)$$

onde:

TP : tolerância para injeção de potência ativa medida;
 TOLP : precisão do medidor de injeção de potência ativa;

MPR : injeção de potência ativa obtida através de um fluxo de potência.

O valor da tolerância T_2 para o fluxo de potência ativa calculado por LKC, na linha 2, entre a barra "i" e a barra "k" é:

$$T_2 = \sqrt{T_1^2 + T_3^2 + T_4^2 + TP_2^2} \quad (3.24)$$

Se o fluxo de potência foi calculado por LKT utiliza-se a equação (3.11) na sua forma inversa, para o cálculo da tolerância dos fluxos de potência calculados. Levando-se em conta aproximações similares às empregadas para se obter (3.12), têm-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{ij} \\ \Delta Q_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & 0 \\ 0 & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_{ij} \\ \Delta V_{ij} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

onde:

ΔP_{ij} : tolerância para o fluxo de potência ativa calculado na linha de "i" para "j";

ΔQ_{ij} : tolerância para o fluxo de potência reativa calculado na linha de "i" para "j";

$\Delta \delta_{ij}$: tolerância para a abertura angular da linha;

ΔV_{ij} : tolerância para a queda da magnitude de tensão na linha ($V_{ij} = V_i - V_j$).

As derivadas parciais são apresentadas no Apêndice B.

No cálculo das tolerâncias para os fluxos de potência ativa e reativa medidos, obtidos através das equação (3.25), não são considerados os valores encontrados menores que 0,01. Nestes casos, adota-se para as tolerâncias um valor igual a 0,01.

Para possibilitar uma calibração adequada dos testes de coerência introduz-se, para cada tipo de teste, um fator de calibração "k" [1]. Deste modo, a margem de tolerância para um determinado teste T é definida como:

$$T_f = k T \quad (3.26)$$

onde:

T_f : margem de tolerância aplicada ao teste;

k : fator de calibração;

T : valor da tolerância obtida para o teste.

A seguir será feita uma breve demonstração da obtenção das margens de tolerâncias para os testes de consistência realizados sobre a rede.

3.2.4.3 - Cálculo da margem de tolerância para testes de magnitude de tensão

Este teste consiste em verificar se a diferença entre a magnitude da tensão medida e a magnitude da tensão calculada é menor que a tolerância obtida para o teste. Esta tolerância é obtida a partir dos valores de tolerância individuais para a magnitude de tensão medida e calculada.

Sendo:

TOLVR(BA) : tolerância para a magnitude da tensão medida na barra BA;

TOLVC(BA) : tolerância para a magnitude da tensão calculada na barra BA;

TTESTV : tolerância para teste de tensão;

MTOV : fator de ajuste para o teste de tensão.

Então:

$$TTESTV = MTOV \sqrt{[TOLVR(BA)]^2 + [TOLVC(BA)]^2} \quad (3.27)$$

3.2.4.4 - Cálculo da margem de tolerância para testes

LKT

Este teste basicamente consiste em verificar se a diferença entre uma medida de fluxo de potência ativa e reativa e o valor calculado para estes fluxos é menor que a margem de tolerância encontrada para o teste.

São calculadas duas margens de tolerância, uma para teste LKT ATIVO e outra para teste LKT REATIVO. O procedimento utilizado para ambos os casos é similar.

Para exemplificar o cálculo da margem de tolerância utilizadas em teste LKT, serão utilizadas variáveis, que assumirão valores distintos dependendo se o teste for em relação a fluxo de potência ativa ou fluxo de potência reativa.

Sendo:

TTKVL : tolerância para teste LKT;

TOLFM(LIN) : tolerância calculada em função do valor medido do fluxo de potência na linha;
 TOLFC(LIN) : tolerância calculada em função do valor calculado do fluxo de potência na linha;
 MTOKVL : fator de ajuste de tolerância para teste LKT;

$$TTKVL = MTOKVL \sqrt{TOLFM(LIN)^2 + TOLFC(LIN)^2} \quad (3.28)$$

O valor de MTOKVL assume valores distintos para testes envolvendo fluxo de potência ativa e para testes de fluxo de potência reativa.

3.2.4.5 - Cálculo da margem de tolerância para testes LKC

Este teste é realizado comparando-se o somatório dos fluxos de potência em uma barra com o valor da margem de tolerância obtida para este teste. Como já foi visto, cada fluxo participante do teste, tem associado a ele, um valor de tolerância calculada.

Sendo:

TTKCL : tolerância para teste LKC;
 TOLF : tolerância para fluxos na barra (incluindo medidas de injeção de potência);
 MTOKCL: fator de ajuste de tolerância para teste LKC;
 Ni : número de linhas incidentes na barra.

$$TTKCL = MTKKCL \sqrt{\sum_{i=1}^{N_i} [TOLF(i)]^2} \quad (3.29)$$

A equação (3.29) é válida tanto para testes envolvendo fluxo de potência ativa, quanto para testes envolvendo fluxo de potência reativa. Os valores são variáveis para cada tipo de teste.

3.2.5 - Verificação dos resultados

Após o cálculo dos estados da rede, e conseqüentemente após a realização de todos os testes, há condições de se efetuar uma avaliação a respeito das notas atribuídas aos valores medidos. Conforme já mencionado, durante a realização dos testes as medidas participantes dos mesmos recebem notas de valor +1 quando o resultado do teste é considerado BOM, e -1 quando o resultado do teste é considerado RUIM.

Cada medida apresenta no final do processo uma quantidade de notas boas, representando o número de testes em que participou cujo resultado foi BOM, e uma quantidade de notas ruins, representando o número de testes em que participou cujo resultado foi RUIM.

De posse destes valores é apresentada uma planilha onde consta, para cada medida efetuada sobre a rede:

- o número total de testes em que a medida participou;
- o número total de testes cujos resultados são BONS;

- o número total de testes cujos resultados são RUINS;
- o saldo das notas obtidas para estas medidas.

Todas as medidas que detêm saldo negativo são consideradas suspeitas de conterem EG, e são colocadas em uma lista de medidas suspeitas.

A lista de medidas suspeitas é constituída de duas partes, uma para medidas de fluxo de potência ativa e medidas de injeção de potência ativa, e outra para medidas de magnitude de tensão, fluxo de potência reativa e injeção de potência reativa. Isto se deve à consideração de desacoplamento destas variáveis utilizado anteriormente.

Ao final do processo, têm-se disponível:

- o número total de testes efetuados;
 - o número total de testes discriminados conforme o tipo de teste (tensão, LKT ativo, LKC reativo, etc).
- Além disso, para cada tipo de teste são indicados:
- a quantidade de testes cujos resultados foram bons;
 - a quantidade de testes cujos resultados foram ruins;
 - o número total de testes ruins considerando as medidas ativas;
 - o número total de testes ruins considerando as medidas de tensão e fluxo de potência reativa.

Finalmente para cada tipo de teste, são fornecidas informações sobre:

- o valor da discrepância obtida para o teste;
- a margem de tolerância do teste;
- as medidas envolvidas na execução do teste.

3.3 - Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentado um método baseado em técnica de busca em grafos para ser utilizado na pré-filtragem de erros grosseiros em medidas analógicas.

Foi apresentada a maneira pela qual os estados são calculados, os fluxos de potência são obtidos e como foram executados os testes de consistência necessários à detecção e identificação de medidas espúrias.

CAPÍTULO 4

ASPECTOS COMPUTACIONAIS DO MÉTODO PROPOSTO

4.1 - Introdução

Este capítulo visa apresentar a maneira como foi implementado o método descrito no capítulo anterior.

Serão apresentados de forma distinta os procedimentos utilizados na entrada de dados, no desenvolvimento dos cálculos e na saída dos resultados. O programa computacional que implementa o método proposto foi desenvolvido utilizando a linguagem FORTRAN 77. Os programas utilizados como base de dados foram desenvolvidos utilizando o FORTRAN IV.

O computador utilizado no desenvolvimento do trabalho e nas simulações foi o IBM-4341.

4.2 - Entrada de Dados

O fluxo dos dados necessários a implementação da simulação de medidas está mostrado no diagrama de blocos da Figura 4.1.

O programa NEWMOD 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.

Estes valores são importantes para o cálculo das tolerâncias associadas aos valores medidos usados no método de pré-filtragem proposto.

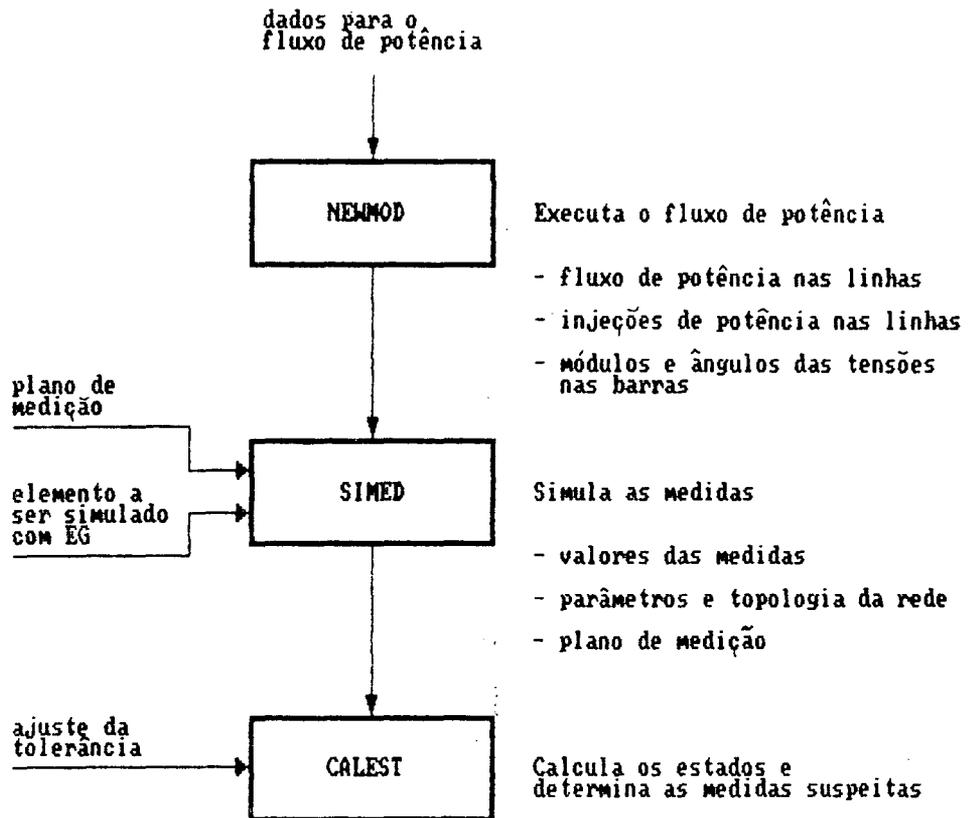


FIGURA 4.1 - Seqüência de programas utilizados.

O programa NEWMOD gera um arquivo que contém parte dos dados para a execução do programa SIMED.

Os dados referentes às simulações das medidas são obtidos, através do programa SIMED. Este programa simula o valor de uma quantidade medida, utilizando a seguinte equação:

$$Z = Z_0 + S \quad A_c \quad |Z_0| \quad (4.1)$$

onde:

Z : valor simulado da medida;

Z_0 : valor real da medida, obtido através de um programa de fluxo de potência;

S : variável aleatória com distribuição normal, média zero e desvio-padrão igual a 1;

A_c : precisão associada ao medidor.

A partir da equação (4.1) é possível simular medidas, variando-se a precisão do medidor (A_c).

Para o cálculo das tolerâncias dos valores calculados necessárias ao procedimento de pré-filtragem proposto é necessário o conhecimento da precisão considerada na simulação dos valores medidos.

O programa SIMED tem como opção a simulação de erros grosseiros em medidas.

Os dados de entrada do programa SIMED 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.

Os dados necessários para a execução do programa CALEST, o qual implementa o método proposto são gerados pelo programa SIMED e consistem na localização e valor de cada medida, além da topologia e dos parâmetros da rede.

Os valores para os fatores de ajuste k (da equação 3.26), discriminados conforme o tipo do teste, são fornecidos ao programa CALEST e são os seguintes:

- MTO : Fator de ajuste para teste LKT ATIVO;
- MTOR : Fator de ajuste para teste LKT REATIVO;
- MTOV : Fator de ajuste para teste de TENSÃO;
- MTOK : Fator de ajuste para teste LKC ATIVO;
- MTOKT: Fator de ajuste para teste LKC REATIVO.

O valor para cada ajuste, obtido através dos testes realizados em diversos sistemas, estão em torno dos seguintes valores:

MTO = 1,2;
MTOR = 1,2;
MTOV = 1,0;
MTOK = 1,2;
MTOKR = 1,2.

4.3 - Rotinas de Desenvolvimento

Pode-se dividir o desenvolvimento do programa CALEST basicamente em quatro partes:

- cálculo das tensões complexas nas barras;
- cálculo dos fluxos de potência ativa e reativa nas linhas;
- cálculo das margens de tolerância para as medidas e testes;
- compilação dos resultados.

Cada uma destas partes será detalhada nas seções seguintes.

4.3.1 - Cálculo das Tensões Complexas nas Barras

O cálculo da magnitude e do ângulo da tensão nas barras é executado pelas subrotinas VCALC1 ou VCALC2. A escolha entre elas depende somente da maneira como estão distribuídas as medidas efetuadas sobre a rede. Conforme o plano de medição efetuado sobre a rede, aparecem duas configurações que permitem o cálculo das tensões complexas na rede, a saber:

- Os fluxos de potência ativa e reativa na linha são medidos na mesma extremidade da barra cuja tensão complexa é conhecida, como está ilustrado na Figura 4.2;

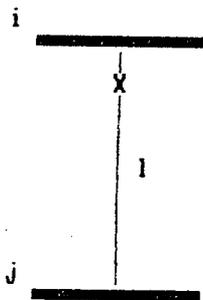


FIGURA 4.2 - Cálculo da tensão V_j por VCALC1.

X : fluxo de potência ativa e reativa P_{ij} e Q_{ij} medidos ou calculados.

- Os fluxos de potência ativa e reativa na linha são medidos na extremidade oposta a barra cuja tensão complexa é conhecida, conforme mostrado na Figura 4.3.

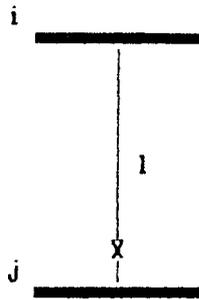


FIGURA 4.3 - Cálculo da tensão V_j por VCALC2.

Em relação a Figura 4.2, a solução é obtida em VCALC1 utilizando a equação 3.1 a qual será reescrita a seguir:

$$E_{ij} = Z \left(\frac{P_{ij} - jQ_{ij}}{V_i} - \frac{V_i Y}{2} \right) \quad (4.2)$$

Conhecendo-se a queda de tensão complexa entre a barra "i" e a barra "j", E_{ij} , e o módulo e ângulo de tensão da barra "i", obtêm-se o módulo e o ângulo de tensão da barra "j", através das equações:

$$V_j = |V_i - E_{ij}| \quad (4.3)$$

$$\delta_j = \text{arc tg} \frac{\text{Im} (V_i - E_{ij})}{\text{Re} (V_i - E_{ij})} \quad (4.4)$$

Se a configuração do sistema se apresentar como mostra a Figura 4.3, a solução é obtida na subrotina VCALC2.

Não é possível, neste caso, utilizar a equação (4.2), pois a tensão V_j não é conhecida.

Para se calcular a tensão complexa na barra "j", utiliza-se uma rotina para a solução de sistemas de equações não-lineares. Esta rotina é utilizada tanto para o cálculo da magnitude de tensão na barra, quanto para se obter o ângulo da mesma tensão.

4.3.2 - Cálculo dos fluxos de potência ativa e reativa nas linhas

Os fluxos de potência ativa e reativa nas linhas podem ser calculados através de duas subrotinas:

- subrotina FKVL;
- subrotina FKCL.

Na subrotina FKVL, os fluxos de potência ativa e reativa na linha são calculados utilizando as equações (3.5) e (3.6) descritas no Capítulo 3. A implementação é direta, tendo-se apenas que observar se o fluxo calculado será utilizado em teste ou não. Estas duas situações surgem em decorrência do seguinte: foi estipulado no programa que todo fluxo de potência não medido seria calculado. Isto significa que o fluxo deve ser calculado na extremidade oposta a medida. Porém, no caso da realização de um teste de fluxo, o mesmo deve ser calculado na mesma extremidade medida, permitindo com isso a comparação entre o valor medido e o valor calculado.

Os fluxos de potência em uma linha, também são calculados para o caso no qual todos os fluxos incidentes numa barra, com exceção de um, são conhecidos. O cálculo dos fluxos nesta linha, é feito na subrotina FKCL.

4.3.3 - Cálculo das Margens de Tolerância

Como já foi visto no Capítulo 3, é necessário que se determine a tolerância para cada valor calculado, seja ele módulo de tensão, ângulo de tensão, fluxo de potência ativa, etc. Além disso a margem de tolerância utilizada para cada teste efetuado sobre o sistema deve também ser calculada.

A determinação das margens de tolerância para os valores calculados é efetuada em duas subrotinas:

- TOLVOL : subrotina onde são calculadas as tolerâncias para o módulo e ângulo de tensão calculados para a barra;
- TOLFLX : subrotina onde são calculadas as tolerâncias para os fluxos de potência ativa e reativa calculadas.

As tolerâncias para as quedas de tensão complexas nas linhas, são calculadas através da equação (3.10), a qual foi apresentada no Capítulo 3 e será reescrita a seguir:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_{ij} \\ \Delta V_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \delta}{\partial P} & 0 \\ 0 & \frac{\partial V}{\partial Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{ij} \\ \Delta Q_{ij} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

As derivadas parciais são determinadas considerando as seguintes formulações:

$$\left. \frac{\partial \delta_{ij}}{\partial P_{ij}} \right|_{Q=\text{cte}} = \frac{(V_i - K) M + L N}{V_j^2} \quad (4.6)$$

$$\left. \frac{\partial V_{ij}}{\partial Q_{ij}} \right|_{P=\text{cte}} = \frac{(V_i - K) M + L N}{V_j} \quad (4.7)$$

onde:

$$K = \frac{R P_{ij}}{V_i} + \frac{X Q_{ij}}{V_i} + X V_i \frac{B}{2} \quad (4.8)$$

$$L = \frac{X P_{ij}}{V_i} - \frac{R Q_{ij}}{V_i} - R V_i \frac{B}{2} \quad (4.9)$$

$$M = \frac{X}{V_i} \quad (4.6)$$

$$N = \frac{R}{V_i} \quad (4.7)$$

Sendo:

P_{ij} : fluxo de potência ativa na linha medida na barra i ;

Q_{ij} : fluxo de potência reativa na linha medida na barra i ;

V_i : magnitude de tensão na barra i ;

V_j : magnitude de tensão na barra j ;

R : resistência na linha;

X : reatância série na linha;

B : reatância shunt na linha.

A demonstração das equações (4.2), (4.3), (4.4), (4.5), (4.6) e (4.7) encontra-se no Apêndice B.

A tolerância para os fluxos de potência ativa e reativa calculados nas linhas pela subrotina FKVL, é executada na subrotina TOLFLX através da equação (3.25). Na implementação é considerado que o valor da tolerância para os fluxos P_{ij} e Q_{ij} é igual ao valor da tolerância para os fluxos P_{ji} e Q_{ji} .

A tolerância para os fluxos calculados em FKCL, baseado na lei de Kirchhoff para corrente, é calculada na própria subrotina FKCL. Para um fluxo obtido através da soma algébrica dos fluxos em uma barra, a margem de tolerância para este fluxo é obtida através da equação (3.20).

Finalmente, o programa ainda utiliza a subrotina TOLFRE, que calcula a tolerância dos fluxos medidos, considerando o fluxo real verificado na linha e a precisão dos medidores. Este resultado é utilizado no cálculo da tolerância para os valores calculados das tensões complexas nas barras.

4.3.4 - Compilação dos Resultados

Após a realização dos testes de consistência é efetuada uma busca sobre a árvore do sistema para identificar as medidas participantes dos mesmos. Esta busca é feita através da rotina TREPHE.

Para que a busca se efetue, é necessário que a árvore tenha sido armazenada de maneira tal que para qualquer nó da rede seja possível se obter quais as arestas da árvore e quais

os nós que são conectados a ele. Este tipo de armazenamento é efetuado pela subrotina ADDT.

Toda vez que uma tensão complexa na rede é calculada, a linha cujo fluxo foi utilizado, é integrada à árvore. Para cada uma destas linhas, são armazenadas e identificadas as medidas que participaram do cálculo da tensão complexa. Esta identificação é feita separadamente, ou seja, há um vetor contendo as medidas de fluxo ativo e injeção de potência ativa que participaram do cálculo, e um vetor contendo medidas de magnitude de tensão, fluxo de potência reativa e injeção de potência reativa que, por sua vez, participaram do cálculo do estado da barra. Este procedimento é efetuado na subrotina IDENT.

A medida que cada teste vai sendo realizado, todas as informações referentes a ele tais como:

- tipo de teste : tensão, LKT, LKC;
- número do teste;
- barra ou linha onde o teste esta sendo realizado;
- resultado do teste para medidas ativas e reativas;
- linhas da rede pertencentes a árvore, envolvidas no teste.

Estas linhas são armazenadas numa variável bidimensional chamada SETEST, de dimensões $M1 \times NM3$, onde $M1$ significa o número de testes realizados e $NM3$ o número de barras N mais 3. Cada linha ($M1$) desta matriz contém informações a respeito de cada teste realizado, tanto da parte ativa, quanto da parte reativa. As colunas de 1 a $(N-1)$ de SETEST, onde N é o número de barras do sistema, destinam-se ao armazenamento das linhas pertencentes a árvore que participaram do teste.

A coluna N de SETEST identifica o tipo de teste realizado, a saber:

- SETEST (M1 , N) = 1 : teste de tensão;
- SETEST (M1 , N) = 2 : teste LKT;
- SETEST (M1 , N) = 3 : teste LKC.

As colunas NM1 e NM2 identificam o resultado obtido para os testes em relação a parte ativa e reativa respectivamente. Considerando os teste LKT e LKC ativo, a coluna NM1 da variável SETEST pode ser:

- SETEST (M1 , NM1) = 1 : resultado do teste considerando a parte ativa foi BOM;
- SETEST (M1 , NM1) = 0 : resultado do teste considerando a parte ativa foi RUIM.

Para os testes LKT, LKC e tensão, a coluna NM2 identifica o resultado do teste com relação as medidas reativas, sendo de modo similar ao descrito para a parte ativa.

A última coluna de SETEST, NM3, identifica o elemento onde o teste foi realizado. Para os testes de tensão e LKC, a coluna NM3 conterá o número da barra onde o teste foi realizado. Para o teste LKT, na coluna NM3 aparecerá o número da linha cuja medida de fluxo foi testada.

Após o término do processo de cálculo dos estados, e conseqüentemente da realização dos testes, a variável SETEST contém todas as informações necessárias para o fornecimento dos resultados.

A Figura 4.4 apresenta a estrutura utilizada na implementação do método apresentado.

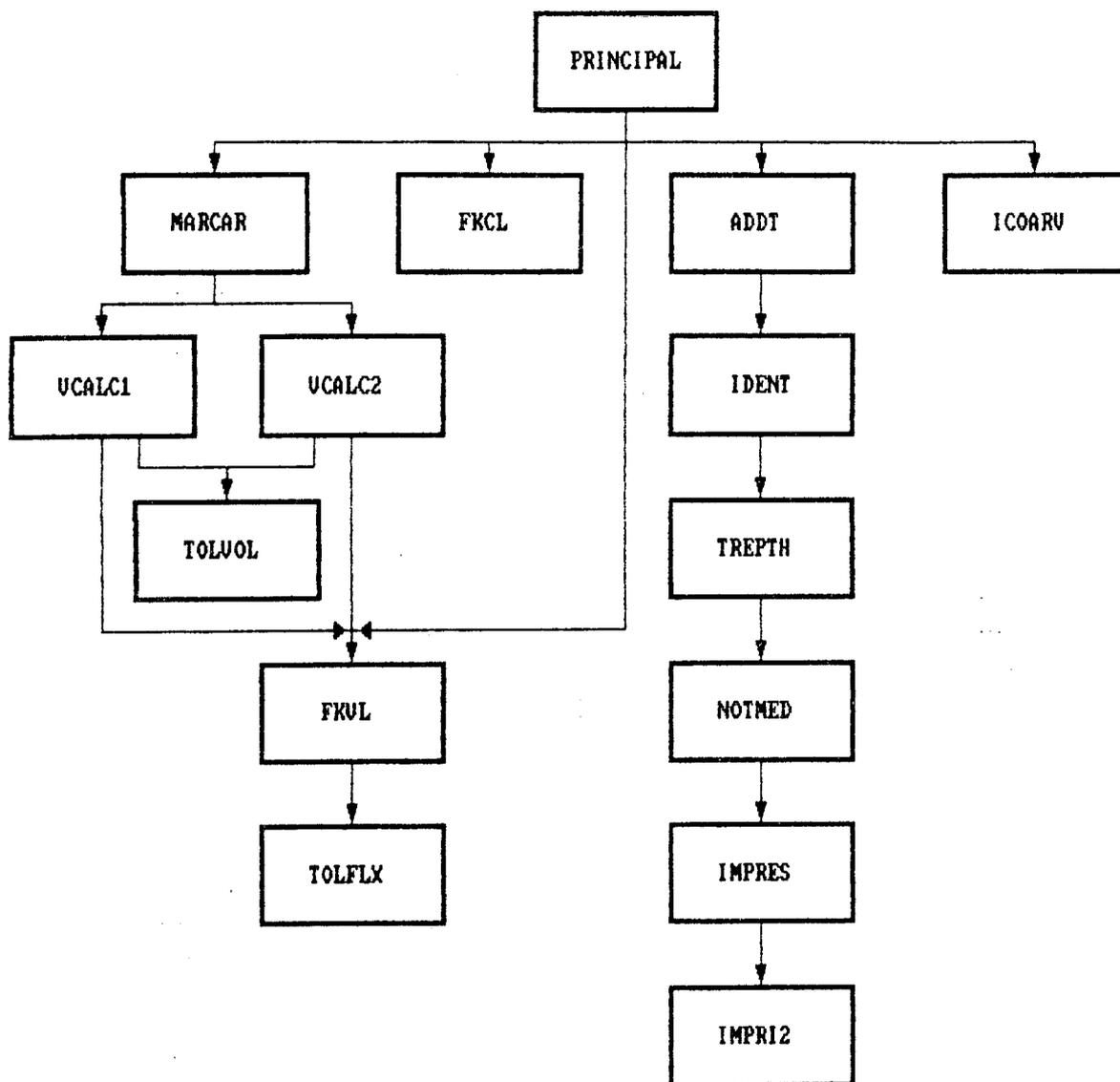


FIGURA 4.4 - Estrutura das rotinas utilizadas na implementação do método de Pré-Filtragem utilizando a busca em grafos.

Algmas rotinas ainda são importantes destacar:

* NOTMED *

Rotina responsável pela atribuição das notas às medidas. Para cada medida existem dois vetores para nota, um para armazenar as notas boas e outro para as notas ruins.

*** ICOARV ***

Rotina que identifica medidas envolvidas no cálculo de um fluxo de potência em linhas não pertencentes à árvore do sistema, mas sim à co-árvore.

*** IMPRES ***

Rotina que armazena, para cada tipo de teste, os elementos que devem ser impressos.

*** IMPRI2 ***

Rotina de impressão relativa aos testes efetuados.

4.4 - Apresentação dos Resultados

O programa apresenta como saída, os seguintes itens:

RESULTADOS REFERENTES A BARRAS:

Para cada barra do sistema, tem-se:

- a magnitude da tensão medida;
- a magnitude da tensão calculada;
- o ângulo de tensão calculado;
- a injeção de potência ativa medida;
- a injeção de potência reativa medida;
- tolerância para o cálculo do ângulo de barra;

- tolerância para o cálculo do módulo de tensão de barra.

RESULTADOS REFERENTES A LINHAS:

Para cada linha são apresentados:

- os valores medidos e calculados para os fluxos de potência ativa e reativa;
- fluxos de potência ativa e reativa calculados;
- tolerância para fluxo de potência ativa e reativa calculados.

É apresentado também, uma estatística de testes, onde consta:

- número total de testes efetuados;
- número de testes de tensão;
- número de testes LKT ativo;
- número de testes LKT reativo;
- número de testes LKC ativo e
- número de testes LKC reativo.

Para cada um destes testes, é verificado o número deles cujo resultado é BOM, e o número deles cujo resultado é RUIM.

É apresentado para cada medida, seja de fluxo de potência ativa, fluxo de potência reativa, medida de tensão, um balanço dos testes nos quais a medida participou, ou seja:

- número de testes BONS;
- número de testes RUINS;
- número total de testes;
- saldo dos testes (testes BOM - testes RUINS).

Todas as medidas que apresentarem saldo negativo, são colocadas em uma lista de medidas suspeitas. Portanto é elaborada uma lista de medidas ativas suspeitas e uma lista de medidas reativas suspeitas.

4.5 - Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada a estratégia computacional utilizada para a implementação do método proposto no Capítulo 3. Mostrou-se a interligação entre os programas necessários a simulações de erros grosseiros no sistema, bem como uma breve demonstração das rotinas utilizadas para o cálculo dos estados do sistema e detecção de erros grosseiros em medidas analógicas.

CAPÍTULO 5

SIMULAÇÕES E RESULTADOS

5.1 - Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através da implementação do método descrito no Capítulo 3.

Vários testes foram realizados sobre os seguintes sistemas:

- IEEE 14 barras;
- IEEE 30 barras.

As simulações foram feitas baseadas em três tipos de plano de medição:

- baixa redundância ($\eta \approx 1,14$);
- média redundância ($\eta \approx 1,70$);
- alta redundância ($\eta \approx 2,00$).

5.2 - Resultados dos testes

Para a implementação do método apresentado no Capítulo 3, foram necessárias algumas considerações que serão abordadas a seguir.

Como os ângulos de tensão não são medidos, é arbitrado ângulo de tensão igual a zero para a barra de origem, e todos os ângulos de tensão nas barras são calculados em relação a esta referência. O valor arbitrado para a tolerância do ângulo da barra de origem é zero, já que este valor é determinístico.

Os resultados obtidos variam conforme a redundância das medidas. Quanto maior a quantidade de medidas efetuadas na rede, maior é o número de testes realizados e conseqüentemente mais fácil a detecção e identificação de erros grosseiros.

Para erros grosseiros simples e com nível de redundância adequada, a detecção é, na grande maioria das vezes, imediata. Verificou-se também que, na simulação de vários erros grosseiros, as medidas correspondentes sempre constavam da lista de medidas suspeitas.

Na maioria dos casos testados, as medidas que apresentavam erros grosseiros eram as que apresentavam o maior saldo negativo na participação dos testes de consistência.

Por outro lado pôde-se observar que um erro numa medida de fluxo de potência ativa pode se refletir num cálculo incorreto para um fluxo de potência reativa.

Este fato, porém, não chega a prejudicar o desempenho do algoritmo, nem a opção utilizada baseada no acoplamento P- δ , Q-V, pois isto ocorre em sistemas onde existem linhas cuja relação X/R é baixa, como é o caso do sistema IEEE 30 barras. Para sistemas deste tipo a hipótese do desacoplamento pode falhar.

Conforme o plano de medição considerado e a topologia da rede, pode acontecer que mais de uma medida apresente o mesmo saldo negativo, tornando quase que impossível a detecção precisa. Porém através da lista de medidas suspeitas é possível através da eliminação gradual de cada uma delas se obter a medida portadora de erro grosseiro.

Sempre que houver pelo menos uma medida portadora de EG, espera-se que esta medida conste desta lista, já que as medidas portadoras de EGs apresentam na grande maioria das vezes

(sistemas com "boa" redundância), saldo negativo maior que as outras.

Nas subseções seguintes serão apresentados os resultados obtidos para diferentes conjuntos de EGs simulados, nos diferentes sistemas de potência, com distintos planos de medição.

No sistema IEEE-14 barras a ausência de injeção na barra 7 é considerada como duas medidas de injeção de potência: injeção de potência ativa e injeção de potência reativa.

5.2.1 - Erros grosseiros para sistema IEEE-14 barras com 32 medidas

Esta subseção apresenta os resultados obtidos para o sistema IEEE-14 barras com um plano de medição de redundância igual a 1,18, ou seja, um valor bastante baixo.

Foram realizados cinco testes neste sistema, verificando-se ser a detecção impossível em alguns casos. Isto acontece, por exemplo, se houver um EG na medida de injeção na barra 14, pois esta medida não participa de nenhum teste. Como pode-se observar, esta medida é crítica, conforme definida no Capítulo 2, portanto nem o mais sofisticado método de processamento de erros grosseiros poderia detectá-la. Procedimento similar ocorre para o caso onde existam conjuntos críticos, pois a eficiência do método apresentado depende da quantidade de testes de consistência realizados.

O sistema utilizado nas simulações com o respectivo plano de medição estão apresentados na Figura 5.1.

A ausência de injeção na barra 7 é considerada uma medida fora de suspeita para as injeções de potência ativa e reativa da barra, pois tem valor igual a zero.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos para o plano de medição mostrado na Figura 5.1, cujos valores dos fatores de ajuste para os diversos tipos de testes, obtidos através de várias simulações são:

MTOV : 1,0;

MTO : 0,8;

MTOR : 1,2;

MTOK : 0,8;

MTOKR: 1,0.

Os valores de precisão dos medidores são os seguintes:

TOLP : 2 %; TOLQ : 2 %;

TOLV : 0,1 %; TOLT : 2 %;

TOLU : 2 %.

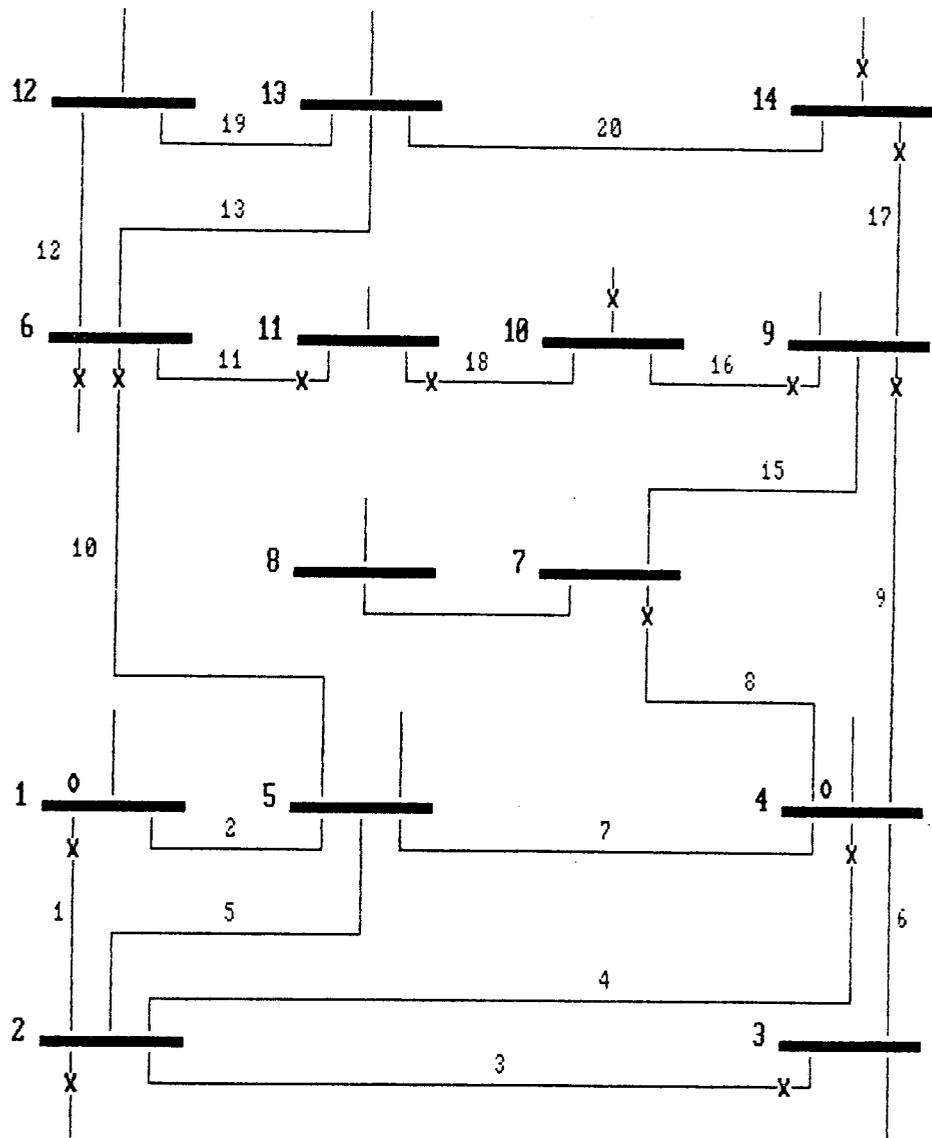


FIGURA 5.1 - Sistema IEEE-14 barras com plano de medição de 32 medidas.

TABELA 5.1 - Resultados do sistemas IEEE de 14 barras com 32 medidas.

MTO = 0,8		MTOR = 1,2		MTOV = 1,0		MTOK = 0,8		MTOKR = 1,0	
Erro Grosseiro	Medidas ativas suspeitas e respectivas notas				Medidas reativas suspeitas e respectivas notas				Tempo (s)
V4	-				V4				0,349
V1	-				V1				0,349
P2, Q2	T1 (1-2)=-2	T11(11-6)=-2	U1 (1-2)=-1	U16(9-10)=-2	T3 (3-2)=-2	T16(9-10)=-2	U3 (3-2)=-2	U18(11-10)=-1	0,393
	T4 (4-2)=-2	T18(11-10)=-1	U4 (4-2)=-1	Q2=-2	T9 (9-4)=-2	P2=-2	U9 (9-4)=-2	Q10=-1	
	T10(6-5)=-2	P10=-1	U11(11-6)=-1						
P6, Q6	não detectada				não detectada				0,339
P10, Q10	P10				Q10				0,323
T1(1-2)	T1 (1-2)=-2	T11(11-6)=-2	V1=-1	U10(6-5)=2	U1(1-2)	T3 (3-2)=-2	T16(9-10)=-2	U11(11-6)=-2	0,379
	T4 (4-2)=-2	T18(11-10)=-1	V4=-1	U16(9-10)=-2	T9 (9-4)=-2	P2=-2	U3(3-2)=-2	U18(11-10)=-1	
	T10(6-5)=-2	P10=-1	U1(1-2)=-3	U16(9-10)=-2	T10(6-5)=-2	P10=-1	U4(4-2)=-3	Q2=-2	
			U9(9-4)=-2	Q10=-1			U9(9-4)=-2	Q10=-1	
T9(9-4)	T1 (1-2)=-2	T11(11-6)=-2	U1 (1-2)=-1	U11(11-6)=-2	U9(9-4)	T3 (3-2)=-2	T16(9-10)=-2	U18(11-10)=-1	0,383
	T4 (4-2)=-2	T18(11-10)=-1	U3 (3-2)=-2	U18(11-10)=-1	U9(9-4)	T9 (9-4)=-2	P2=-2	Q2=-2	
	T10(6-5)=-2	P10=-1	U4 (4-2)=-1	Q2=-2	U10(6-5)=-2	T10(6-5)=-2	P10=-1	Q10=-1	
			U9 (9-4)=-2						
T4(4-2)	T1 (1-2)=-2	T11(11-6)=-2	V1=-1	U9 (9-4)=-2	U4(4-2)	T3 (3-2)=-2	T16(9-10)=-2	U10(6-5)=-2	0,333
	T4 (4-2)=-2	T18(11-10)=-1	V4=-1	U10(6-5)=-2	U4(4-2)	T9 (9-4)=-2	P2=-2	U11(11-6)=-2	
	T10(6-5)=-2	P10=-1	U1 (1-2)=-3	U11(11-6)=-2	T10(6-5)=-2	T10(6-5)=-2	P10=-1	U16(9-10)=-2	
			U3 (3-2)=-2	U16(9-10)=-2				U18(11-10)=-1	
			U4 (4-2)=-3	U18(11-10)=-1				Q2=-2	
			Q10=-1	Q2=-2					
T18(11-10)	T18(11-10)=-1				U18(11-10)=-1				0,379
U18(11-10)									

T3 (3-2) U3 (3-2) P10	T1 (1-2)=-2 T3 (3-2)=-2 T4 (4-2)=-2 T9 (9-4)=-2 T10 (6-5)=-2	T11 (11-6) =-2 T16 (9-10) =-2 T18 (11-10)=-1 P2 =-2	U1 (1-2)=-1 U3 (3-2)=-2 U4 (4-2)=-1 U9 (9-4)=-2 U10 (6-5)=-2	U11 (11-6) =-2 U16 (9-10) =-1 Q2 =-2	0,383
V4 P2 Q10	T1 (1-2)=-2 T3 (3-2)=-2 T4 (4-2)=-2 T9 (9-4)=-2 T10 (6-5)=-2	T11 (11-6) =-2 T16 (9-10) =-2 T18 (11-10)=-1 P2 =-2 P10 =-1	V1 =-1 V4 =-1 U1 (1-2)=-3 U3 (3-2)=-2 U4 (4-2)=-3 Q10 =-1	U9 (9-4) =-2 U10 (6-5) =-2 U11 (11-6) =-2 U16 (9-10) =-2 U18 (11-10)=-1 Q2 =-2	0,379

*) - Tempo de processamento em segundos.

5.2.2 - Erros grosseiros para sistema IEEE-14 barras com 51 medidas

Será apresentado a seguir, o plano de medição para o sistema IEEE-14 barras, conforme mostra a Figura 5.2, cuja redundância global é 1,88. Considerado como um valor de média redundância.

Os fatores de ajuste para os diversos tipos de testes são:

MTOV : 1,0;

MTO : 0,8;

MTOR : 1,2;

MTOK : 0,8;

MTOKR: 1,0.

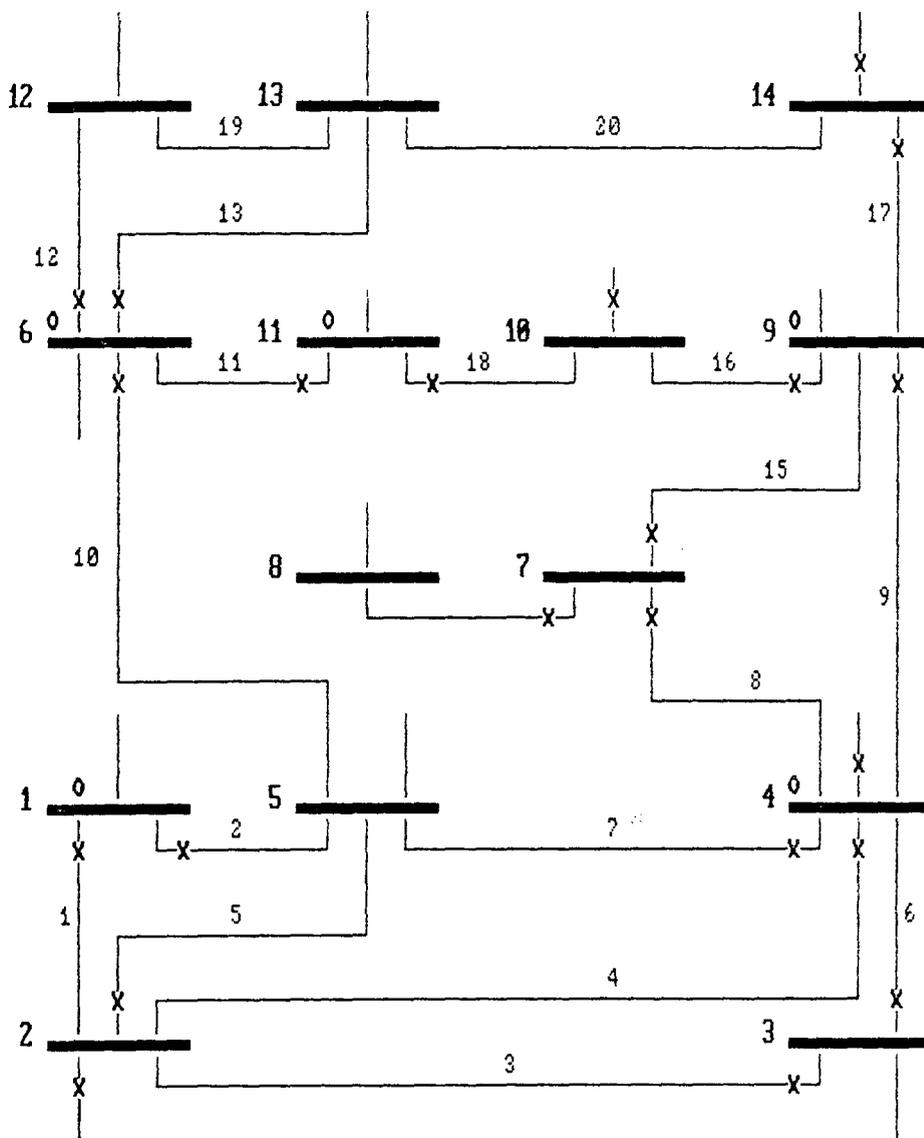


FIGURA 5.2 - Sistema IEEE-14 barras com plano de medição de 51 medidas.

TABELA 5.2 - Resultados do sistemas IEEE de 14 barras com 51 medidas.

MTO = 0,8 MTOR = 1,2 MTOV = 1,0 MTOK = 0,8 MTOKR = 1,0					
Erro Grosseiro	Medidas ativas suspeitas e respectivas notas		Medidas reativas suspeitas e respectivas notas		Tempo (s)
V4	-		V4		0,336
V6, V9	-		V6, V9		0,363
P2, Q2	P2		Q2		0,393
P14, Q14	T17(14-9)=-1 P14 =-1		U17(14-9)=-1 Q14 =-1		0,333
T9(9-4) U9(9-4)	T8 (7-4) =-1 T9 (9-4) =-4 T10(6-5) =-2 T11(11-6)=-2 T16(9-10)=-2	T17(14-9) =-1 T18(11-10)=-1 P4 =-1 P10 =-1 P14 =-1	V9 =-1 U8 (7-4) =-1 U9 (9-4) =-2 U16(9-10)=-2 U17(14-9)=-1	U18(11-10)=-1 Q4 =-1 Q10 =-1 Q14 =-1	0,379
T1(1-2) U1(1-2)	T1 (1-2)=-4 T2 (1-5)=-4 T3 (3-2)=-3 T4 (4-2)=-6 T5 (2-5)=-2 T6 (3-4)=-1 T7 (4-5)=-2 T9 (9-4)=-2 T10(6-5)=-2	T11(11-6) =-2 T16(9-10) =-2 T17(14-9) =-1 T18(11-10)=-1 P2 =-1 P4 =-1 P10 =-1 P14 =-1	U1 (1-2) =-5 U2 (1-5) =-1 U3 (3-2) =-3 U5 (2-5) =-2 U6 (3-4) =-1 U7 (4-5) =-2 U16(9-10)=-2	U17(14-9) =-1 U18(11-10)=-1 Q2 =-1 Q10 =-1 Q14 =-1	0,339
T4(4-2) U4(4-2)	T1 (1-2)=-2 T5 (2-5)=-2 T3 (3-2)=-3 T4 (4-2)=-6 T6 (3-4)=-1 T7 (4-5)=-2 T9 (9-4)=-2 T10(6-5)=-2	T11(11-6) =-2 T16(9-10) =-2 T17(14-9) =-1 T18(11-10)=-1 P2 =-1 P4 =-1 P10 =-1 P14 =-1	U1 (1-2) =-3 U3 (3-2) =-3 U4 (4-2) =-3 U6 (3-4) =-1 U7 (4-5) =-2 U16(9-10)=-2	U18(11-10)=-1 Q2 =-1 Q4 =-1 Q10 =-1 Q14 =-1	0,373
T4(4-2) U4(4-2) T9(9-4) U9(9-4)	T3 (3-2)=-3 T4 (4-2)=-6 T9 (9-4)=-4		U1(1-2)=-3 U3(3-2)=-3 U4(4-2)=-3	U7 (4-5) =-2 U9 (9-4) =-2 U10(9-10)=-2	0,403

T10(6-5) U10(6-5) T17(14-9) U17(14-9) P10	T10(6-5) =-2 T18(11-10)=-1 T11(11-6)=-2 P10 =-1 T16(9-10)=-2 P14 =-1 T17(14-9)=-1	U10(6-5) =-1 U18(11-10)=-1 U16(9-10)=-2 Q10 =-1 U17(14-9)=-1 Q14 =-1	0,406
P14 Q14 V9 V11	T17(14-9)=-1 P14 =-1	V9 =-1 V11 =-1 U17(14-9)=-1 Q14 =-1	0,899

*) - Tempo de processamento em segundos.

5.2.3 - Erros grosseiros para sistema IEEE-14 barras com 102 medidas

Os resultados demonstrados a seguir, são referentes a um plano de medição cuja redundância, igual a 3,77 é considerada alta.

O plano de medição está representado na Figura 5.3.

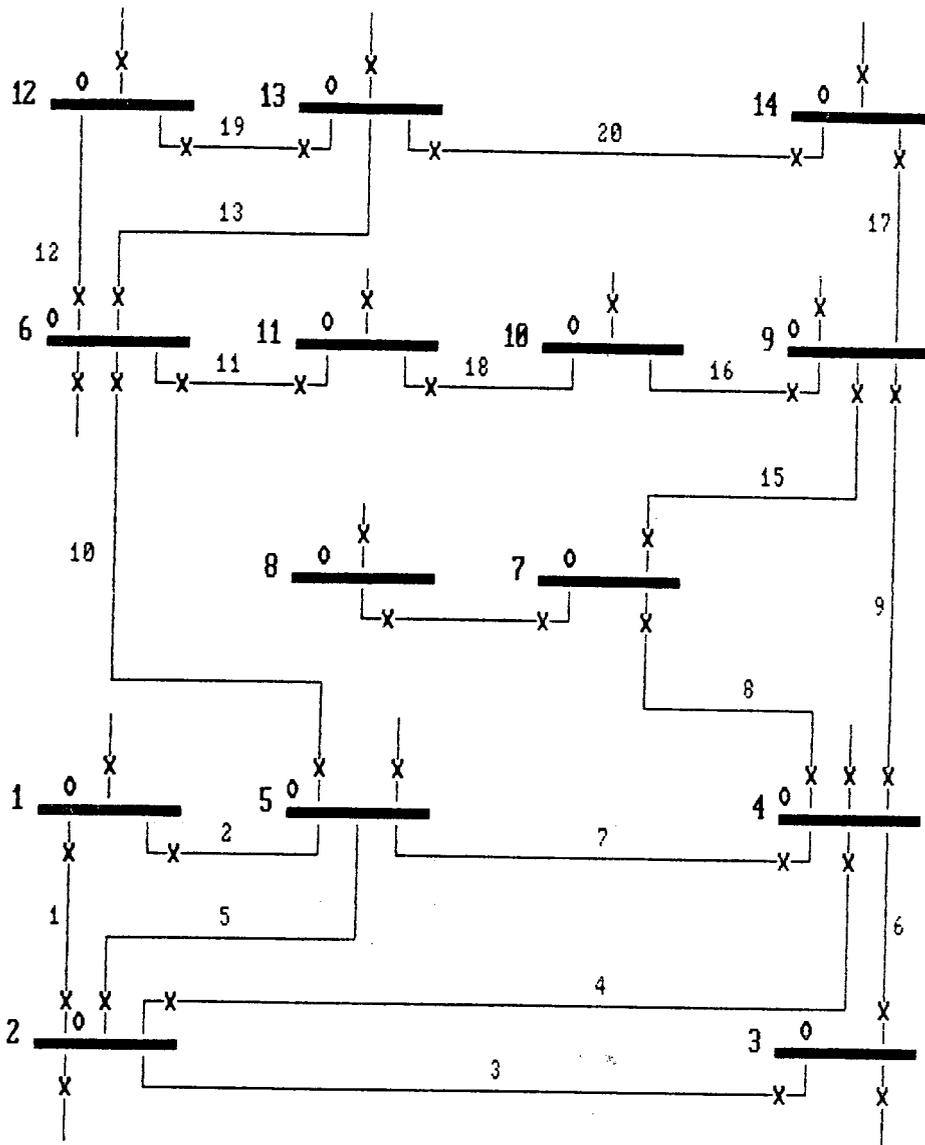


FIGURA 5.3 - Sistema IEEE-14 barras com plano de medição com 102 medidas.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nos diversos testes realizados.

TABELA 5.3 - Resultados do sistemas IEEE de 14 barras com 102 medidas.

MTO = 0,8 MTOR = 1,2 MTOV = 1,0 MTOK = 0,8 MTOKR = 1,0				
Erro Grosseiro	Medidas ativas suspeitas e respectivas notas		Medidas reativas suspeitas e respectivas notas	Tempo (s)
V4 V6 V9	- - -		V4 =-1 V6 =-1 V9 =-1 Q10=-1	0,389
T1 (1-2) U1 (1-2)	T1 (1-2)=-9 T2 (1-5)=-8 T4 (4-2)=-2 T10(6-5)=-4	T16(9-10) =-1 P1 =-1 P5 =-1 P10 =-1	U1 (1-2) =-3 U2 (1-5) =-1 Q1 =-1 Q5 =-1 Q10=-1	0,366
T2 (1-5) U2 (1-5)	T1 (1-2)=-7 T2 (1-5)=-8 T4 (2-4)=-2 T10(5-6)=-4	T16(9-10)=-1 P1 =-1 P5 =-1 P10 =-1	U1 (1-2)=-1 U2 (1-5)=-3 Q1 =-1 Q5 =-1 Q10=-1	0,386
P10 Q10	P10=-1		Q10=-1	0,399
P10 T20 (13-14) U7 (4-5)	T20(13-14)=-2 P10 =-1 P13 =-1		U7 (4-5)=-2 Q4 =-1	0,386
T4 (4-2) U4 (4-2)	T4 (4-2)=-2 P4 =-1		U4 (4-2)=-2 Q4 =-1	0,369
T4 (2-4) U4 (2-4)	T1 (1-2)=-3 T2 (1-5)=-4 T3 (3-2)=-2 T4 (2-4)=-10 T4 (4-2)=-2 T7 (4-5)=-2 T9 (9-4)=-2	T10(5-6) =-4 T16(9-10)=-1 P2 =-1 P4 =-1 P5 =-1 P10 =-1	U1 (2-1)=-2 U4 (2-4)=-3 U4 (4-2)=-2 U7 (4-5)=-2 Q2 =-1 Q4 =-1 Q5 =-1 Q10=-1	0,353
T4 (2-4) U4 (2-4)	T1 (1-2)=-3 T2 (1-5)=-4 T3 (3-2)=-2 T4 (2-4)=-10 T4 (4-2)=-2 T7 (4-5)=-2 T9 (4-9)=-2	T10(5-6) =-4 T16(9-10)=-1 P2 =-1 P4 =-1 P5 =-1 P10 =-1	U1 (2-1)=-2 U4 (2-4)=-3 U4 (4-2)=-2 U7 (4-5)=-2 Q2 =-1 Q4 =-1 Q5 =-1 Q10=-1	0,346

T4(4-2) U4(4-2)	T4(4-2)=-2 P4 =-1	U4(4-2)=-2 Q4 =-1	0,369
T14(7-8) U14(7-8)	T14(7-8)=-2 P7 =-1	U14(7-8)=-1 Q7 =-1	0,393
T14(7-8) U14(7-8)	T14(7-8)=-2 P7 =-1	U14(7-8)=-3 Q7 =-1	0,366
T10(6-5) U10(6-5) T11(6-11) U11(6-11)	T10(6-5) =-2 P6 =-1 T11(6-11)=-4 P10=-1 T16(9-10)=-1	U10(6-5) =-2 U11(6-11)=-3 Q6 =-1 Q10 =-1	0,366
T17(14-9) P11 U19(12-13) V7 U6(3-4)	T17(14-9) =-4 T20(14-13)=-2 P9 =-1 P11 =-1 P14 =-1	V7 =-1 Q3 =-1 U6(3-4) =-2 Q9 =-1 U17(14-9) =-1 Q13=-1 U19(12-13)=-2	0,389
P11 V7	P11=-1	V7=-1	0,333

(*) - Tempo de processamento em segundos.

5.2.4 - Erros grosseiros para sistema IEEE-30 barras com 92 medidas

Nesta subsecção serão apresentados os resultados obtidos para o sistema IEEE-30 barras, considerando um conjunto de 92 medidas, cuja redundância é 1,55. Pode-se considerar que a redundância é baixa, implicando em que muitas medidas não participarão de testes. Em consequência, a detecção de EGs nestas medidas, será praticamente impossível. É possível que muitas destas medidas sejam críticas, ou percententes a um conjunto crítico o que para o método apresentado significa baixa eficiência na detecção dos erros grosseiros, pois os testes realizados provavelmente não englobam estas medidas.

A Figura 5.4 apresenta o plano de medição utilizados nos testes apresentados na Tabela 5.4.

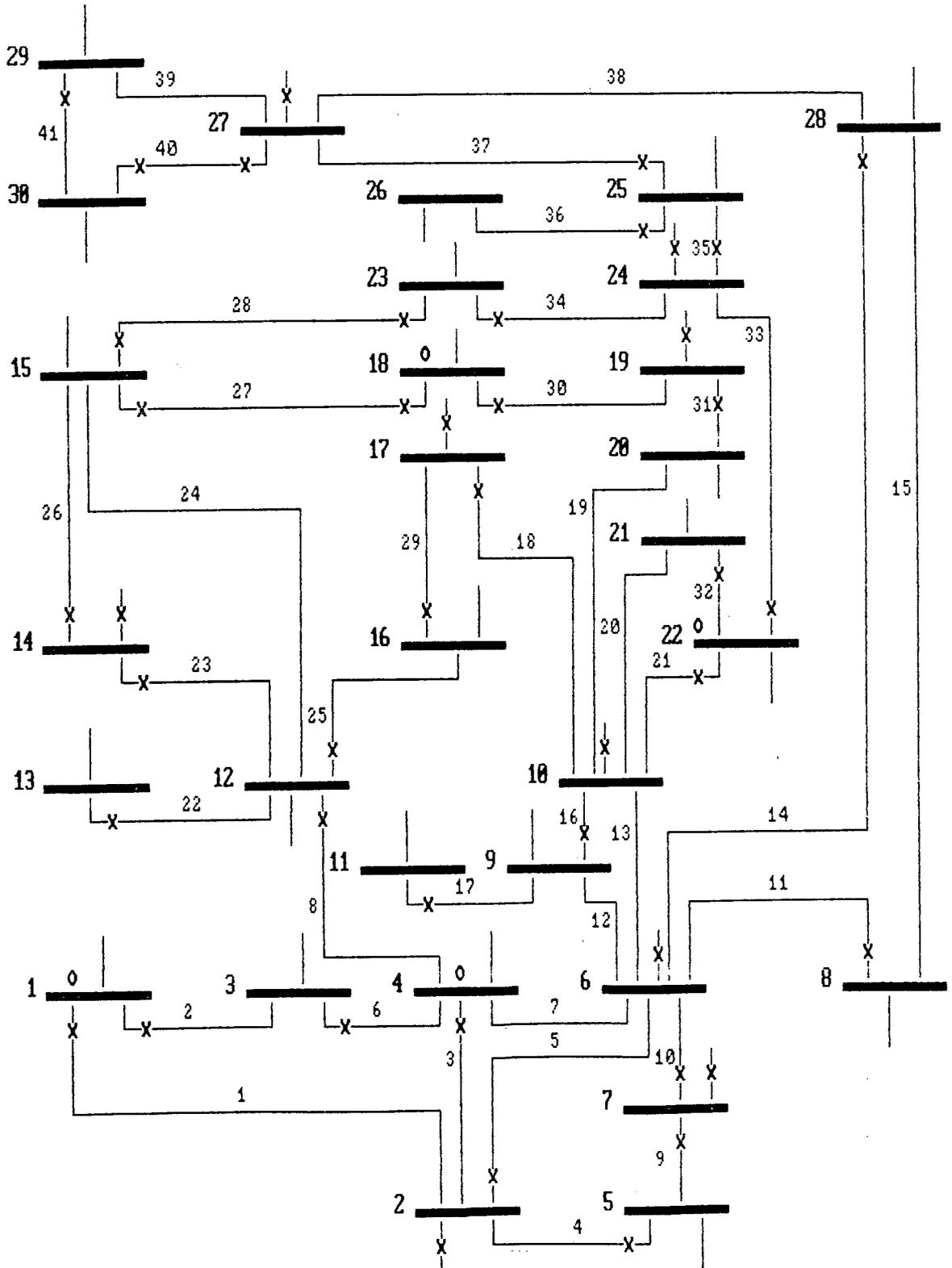


FIGURA 5.4 - Sistema IEEE-30 barras com plano de medição de 92 medidas.

TABELA 5.4 - Resultados do sistemas IEEE de 30 barras com 92 medidas.

MTO = 0,8 MTOR = 1,2 MTOV = 1,0 MTOK = 0,8 MTOKR = 1,0

Erro Grosseiro	Medidas ativas suspeitas e respectivas notas	Medidas reativas suspeitas e respectivas notas	Tempo (s)
T5(2-6) U5(2-6)	T3(4-2) = -1 T11(8-6) = -1 T4(5-2) = -3 T14(28-6) = -1 T5(2-6) = -2 T37(25-27) = -1 T8(12-4) = -1 T41(29-30) = -1 T9(7-5) = -1 P2 = -1 P6 = -1 P27 = -1	U1(1-2) = -2 U37(25-27) = -1 U4(5-2) = -3 U41(29-30) = -1 U5(2-6) = -3 Q2 = -1 U9(7-5) = -1 Q6 = -1 U11(8-6) = -1 Q27 = -1 U14(28-6) = -1	0,833
T4(5-2) U4(5-2)	T4(5-2) = -3 T14(28-6) = -1 T5(2-6) = -2 P2 = -1 T9(7-5) = -1 P6 = -1 T11(8-6) = -1	U1(1-2) = -2 U11(8-6) = -1 U4(5-2) = -3 U14(28-6) = -1 U5(2-6) = -3 Q2 = -1 U9(7-5) = -1 Q6 = -1	0,826
V18 V22	-	V28 = -1 V22 = -1	0,803
P10 Q10	não detectou	não detectou	0,826
P6 Q6	T11(8-6) = -1 T14(28-6) = -1 P6 = -1	U11(8-6) = -1 U14(28-6) = -1 Q6 = -1	0,816
T18(17-10) U18(17-10) T37(25-27) U37(25-27)	T8(12-4) = -1 T33(22-24) = -2 T18(17-10) = -3 T34(23-24) = -2 T21(22-10) = -2 T35(24-25) = -2 T23(14-12) = -1 T37(25-27) = -1 T25(12-16) = -2 T41(29-30) = -1 T26(14-15) = -1 P17 = -1 T28(15-23) = -1 P24 = -1 T29(16-17) = -3 P27 = -1	U18(17-10) = -2 U21(22-10) = -1 U25(12-16) = -2 U29(16-17) = -2 U41(29-30) = -1 Q17 = -1 Q27 = -1	0,753
T30(18-19) U30(18-19) T31(19-20) U31(19-20)	T30(18-19) = -1 T31(19-20) = -1 P19 = -1	U30(18-19) = -1 U31(19-20) = -1 Q19 = -1	0,753

P19 Q19 T31(19-20) U31(19-20)	não detectou	não detectou	0,723
P19 Q19	T30(18-19)=-1 T31(19-20)=-1 P19 =-1	U30(18-19)=-1 U31(19-20)=-1 Q19 =-1	0,819
T31(19-20) U31(19-20)	T30(18-19)=-1 T31(19-20)=-1 P19 =-1	U30(18-19)=-1 U31(19-20)=-1 Q19 =-1	0,829

(*) - Tempo de processamento em segundos.

5.2.5 - Erros grosseiros para sistema IEEE-30 bar-ras com 132 medidas

Nesta subseção serão apresentados os resultados obtidos para o sistema IEEE-30 barras, considerando um conjunto de 132 medidas, cujo valor da redundancia é 2.23.

A Figura 5.5 apresenta o sistema IEEE-30 barras com a localização das medidas de módulo de tensão, fluxo de potência e injeção de potência.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.5.

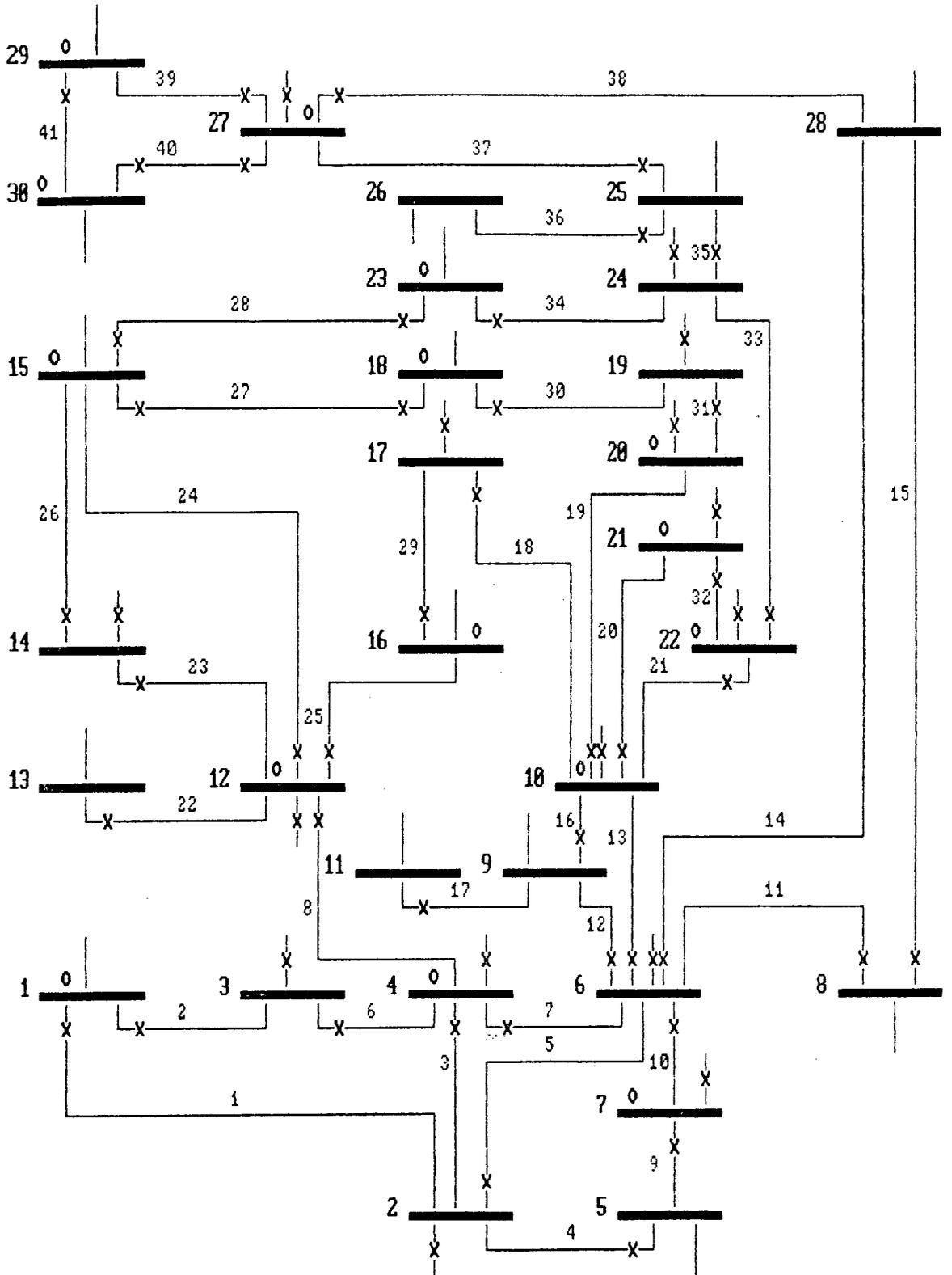


FIGURA 5.5 - Sistema IEEE-30 barras com plano de medição de 132 medidas.

TABELA 5.5 - Resultados do sistemas IEEE de 30 barras com 132 medidas.

MTO = 0,8 MTOR = 1,2 MTOV = 1,0 MTOK = 0,8 MTOKR = 1,0			
Erro Grosseiro	Medidas ativas suspeitas e respectivas notas	Medidas reativas suspeitas e respectivas notas	Tempo (s)
T 5(2- 6) U 5(2- 6)	T 3(4- 2)=-7 T13(6-10)=-4 T 4(5- 2)=-3 T24(12-15)=-2 T 5(2- 6)=-8 T 8(12- 4)=-4	U 1(1- 2)=-5 U18(17-10)=-3 V 5(2- 6)=-7 V12(6- 9)=-3 U13(6-10)=-3	0,906
T 4(5- 2) U 4(5- 2)	T 4(5- 2)=-3 T 9(7- 5)=-1 P2 =-1 P6 =-1	U 4(5- 2)=-2 U 2(10-21)=-1 Q2 =-1 Q10 =-1 Q21 =-1	0,939
T 3(4- 2) U 3(4- 2)	T 1(1- 2)=-2 T 3(4- 2)=-11 T 5(2- 6)=-6 T 8(12- 4)=-6 T13(6-10)=-4 T24(12-15)=-2	U 3(4- 2)=-1 V18(17-10)=-3 outras medidas com saldo -1 influencia do angulo no fluxo reativo	0,929
P10 Q10	P10 =-1 T 3(4- 2)=-1	V20(10-21)=-1 Q10 =-1 Q21 =-1	0,886
T20(10-21) U20(10-21)	T20(10-21)=-4 T21(22-10)=-1 T32(21-21)=-2 P10 =-1 P21 =-1 P22 =-1	V21 -2 U20(10-21)=-3 U21(21-10)=-1 U32(21-22)=-2 Q10 =-1 Q21 =-1 Q22 =-1	0,876
V21	-	V21 =-1 Q10 =-1	0,943
P19 Q19 T31(19-20) U31(19-20)	T19(10-21)=-1 T27(15-18)=-1 T30(18-19)=-1 T31(19-20)=-3 P19 =-1 P20 =-1	U19(10-20)=-1 Q20 =-1 U20(10-21)=-1 Q21 =-1 U30(18-19)=-1 U31(19-20)=-3 Q10 =-1 Q19 =-1	0,893
P19 Q19	P19 =-1	U20(10-21)=-1 Q19 =-1 Q10 =-1 Q21 =-1	0,923

T13(6-10) U14(28- 6)	T 3(4- 2)=-3 T 5(2- 6)=-2 T 8(12- 4)=-4 T12(6- 9)=-3 T13(6-10)=-8 T18(17-10)=-3	T19(10-20)=-3 T24(12-15)=-2 T35(24-25)=-2 outras medi- das com saldo -1.	U 5(2- 6)=-3 U11(8- 6)=-2 U12(6- 9)=-3 U13(6-10)=-3 U14(28- 6)=-3 U35(24-25)=-2	outras medidas com saldo -1	0,906
T13(6-10) U14(28- 6) V10 U21(22-10)	T 3(4- 2)=-3 T 5(2- 6)=-2 T 8(12- 4)=-4 T12(6- 9)=-3 T13(6-10)=-8 T18(17-10)=-3 T19(10-20)=-3 T20(10-21)=-4 T21(22-10)=-5	T24(22-15)=-2 T31(19-20)=-3 T32(21-22)=-2 T33(22-24)=-3 T35(24-25)=-2 (outras medi- das com sal- do -1)	V10 ==-1 V20 ==-1 V21 ==-1 V22 ==-1 U 1(1- 2)=-8 U 5(2- 6)=-10 U11(8- 6)=-2 U12(6- 9)=-3 U13(6-10)=-11 U14(28- 6)=-3	U15(28- 8)=-1 U16(9-10)=-1 U18(17-10)=-1 U19(10-20)=-3 U20(10-21)=-3 U21(22-10)=-3 U31(19-20)=-3 U32(21-22)=-2 U33(22-24)=-4 U35(24-15)=-2	0,926
U14(28- 6)			U11(8- 6)=-2 U12(6- 9)=-1 U13(6-10)=-1 U14(28- 6)=-3 U15(28- 8)=-1 U20(10-21)=-1 Q6 ==-1 Q10 ==-1 Q21 ==-1		0,893
T34(23-24) U34(23-24)	T34(23-24)=-1		U20(10-21)=-1 U34(23-24)=-1 Q10 ==-1 Q21 ==-1		0,906
T28(23-15) U28(23-15) T38(27-28) U38(27-28)	T28(23-15)=-1 T37(25-27)=-2 T38(27-28)=-2 P27 ==-1		U20(10-21)=-1 U28(23-15)=-1 U37(25-27)=-2 U38(27-28)=-2	Q10 ==-1 Q21 ==-1 Q27 ==-1	0,939
T28(23-15) U28(23-15)	T28(23-15)=-1		U20(10-21)=-1 U28(23-15)=-1 Q12 ==-1 Q21 ==-1		0,909
T28(15-23) U28(15-23)	T28(15-23)=-3 T28(23-15)=-1 T34(23-24)=-1 P24 ==-1		U20(10-21)=-1 U28(15-23)=-3 U28(23-15)=-1 U34(23-24)=-1	Q10 ==-1 Q21 ==-1 Q24 ==-1	0,873

*) - Tempo de processamento em segundos.

5.2.6 - Erros grosseiros para sistema IEEE-30 barras com 178 medidas

Considerando um plano de medição com boa redundância (igual a 3.01), é possível detectar praticamente qualquer erro grosseiro presente no plano de medição.

A Figura 5.6 apresenta o sistema IEEE-30 barras onde todos os módulos de tensão são medidos, bem como os valores para injeção de potência ativa e reativa.

Os resultados obtidos para os testes são apresentados na Tabela 5.6.

TABELA 5.6 - Resultados do sistemas IEEE de 30 barras com 178 medidas.

MTO = 0,8 MTOR = 1,2 MTOV = 1,0 MTOK = 0,8 MTOKR = 1,0			
Erro Grosseiro	Medidas ativas suspeitas e respectivas notas	Medidas reativas suspeitas e respectivas notas	Tempo (s)
T13(6-10) U13(6-10)	T 3(4- 2)=-3 T18(17-10)=-3 T 5(2- 6)=-2 T19(10-20)=-3 T 8(12- 4)=-4 T21(22-10)=-2 T12(6- 9)=-3 T24(12-15)=-2 T13(6-10)=-9 T33(22-24)=-2 T35(24-25)=-2	U13(6-10)=-2 U35(24-22)=-2	0,916
T30(18-19) U30(18-19)	T30(18-19)=-2 P18 =-1	U30(18-19)=-2 Q18 =-1	0,949
P18 Q18	P18 =-1	Q18 =-1	0,983
T 1(1- 2) U 1(1- 2)	T 1(1- 2)=-1 P2 =-1 T 2(1- 3)=-2 P4 =-1 P 1 =-1	U 1(1- 2)=-2 Q4 =-1 Q1 =-1 Q2 =-1	0,896
T 3(4- 2) U 3(4- 2)	P4 =-1	Q4 -1	0,929
P4 Q4	P4 =-1	Q4 =-1	0,916
T 5(2- 6) U 5(2- 6)	T 3(4- 2)=-7 outras medi- T 4(5- 2)=-2 das com -1 T 5(2- 6)=-8 T 8(12- 4)=-4 T13(5-10)=-3 T24(12-15)=-2	U 5(2- 6)=-2 Q2 =-1 Q6 =-1 Q17 =-1 Q24 =-1 Q18 =-1	0,966
P28 Q28	P28 =-1	Q28 =-1	0,976
T20(10-21) U20(10-21)	T20(10-21)=-4 T32(21-22)=-2 P10 =-1 P21 =-1 P22 =-1	V21 =-2 Q21 =-1 U20(10-21)=-2 Q22 =-1 U32(21-22)=-2 Q10 =-1	0,946
T34(23-24) U34(23-24)	T34(23-24)=-2 P23 =-1	U34(23-24)=-2 Q23 =-1	0,916
T29(16-17) U29(16-17)	T29(16-17)=-2 P16 =-1	U29(16-17)=-2 Q16 =-1	0,929

T29(16-17)	T 3(4- 2)=-3	T24(12-15)=-4	U 8(12- 4)=-2	0,963		
U29(16-17)	T 5(2- 6)=-2	T25(12-16)=-4	U29(16-17)=-2			
T 8(12- 4)	T 8(12- 4)=-8	T29(16-17)=-2				
U 8(12- 4)	T13(6-10)=-1					
P12	T24(12-15)=-4	P19=-1	U24(12-15)=-2	Q24=-1	0,956	
T24(12-15)	T27(15-18)=-2	P24=-1	Q12	=-1		
U24(12-15)	T28(15-23)=-2		Q15	=-1		
	P15	=-1	Q19	=-1		
T24(12-15)	T 8(12- 4)=-2	P12=-1	V12	=-1	Q19=-1	0,963
U24(12-15)	T23(14-12)=-2	P15=-1	U24(12-15)=-3	Q24=-1		
V12	T24(12-15)=-6	P19=-1	Q12	=-1		
	T27(15-18)=-2	P24=-1	Q15	=-1		
	T28(15-23)=-2					
T15(28- 8)	T15(28- 8)=-2		U15(28- 8)=-2		0,956	
U15(28- 8)	P28	=-1	Q28	=-1		
T41(29-30)	T41(29-30)=-2		U41(29-30)=-2		0,949	
U41(29-30)	P29	=-1	Q29	=-1		
T40(27-30)	T39(27-29)=-2		U40(27-30)=-3		0,949	
U40(27-30)	T40(27-30)=-4		U40(30-27)=-2			
	T40(30-27)=-2		Q27	=-1		
	P27	=-1	Q30	=-1		
	P30	=-1				
T40(30-27)	T40(30-27)=-2		U40(30-27)=-2		0,959	
U40(30-27)	P30	=-1	Q30	=-1		
T40(27-30)	T40(27-30)=-2		U40(27-30)=-3		0,919	
U40(27-30)	T40(30-27)=-2		U40(30-27)=-2			
T40(30-27)	P30	=-1	Q27	=-1		
U40(30-27)			Q30	=-1		

(*) - Tempo de processamento em segundos.

5.2.7 - Erros grosseiros para sistema IEEE-30 barras com 254 medidas

Para um plano de medição completo, isto é, onde são medidas todas as magnitudes de tensão nas barras, as injeções de potência ativa e reativa, e os fluxos de potência ativa e reativa em ambas as extremidades da linha, o número de testes realizados é bastante elevado, possibilitando com isso a detecção de qualquer erro grosseiro. Para uma quantidade pequena de erros grosseiros (1, 2, 3 EGs) a identificação é praticamente total, para uma quantidade maior deles a identificação vai depender bastante do tipo de erro existente. Para erros não-interativos, a identificação é praticamente total.

O valor da redundância para este caso é 4,30.

Os resultados obtidos para os testes encontram-se na Tabela 5.7.

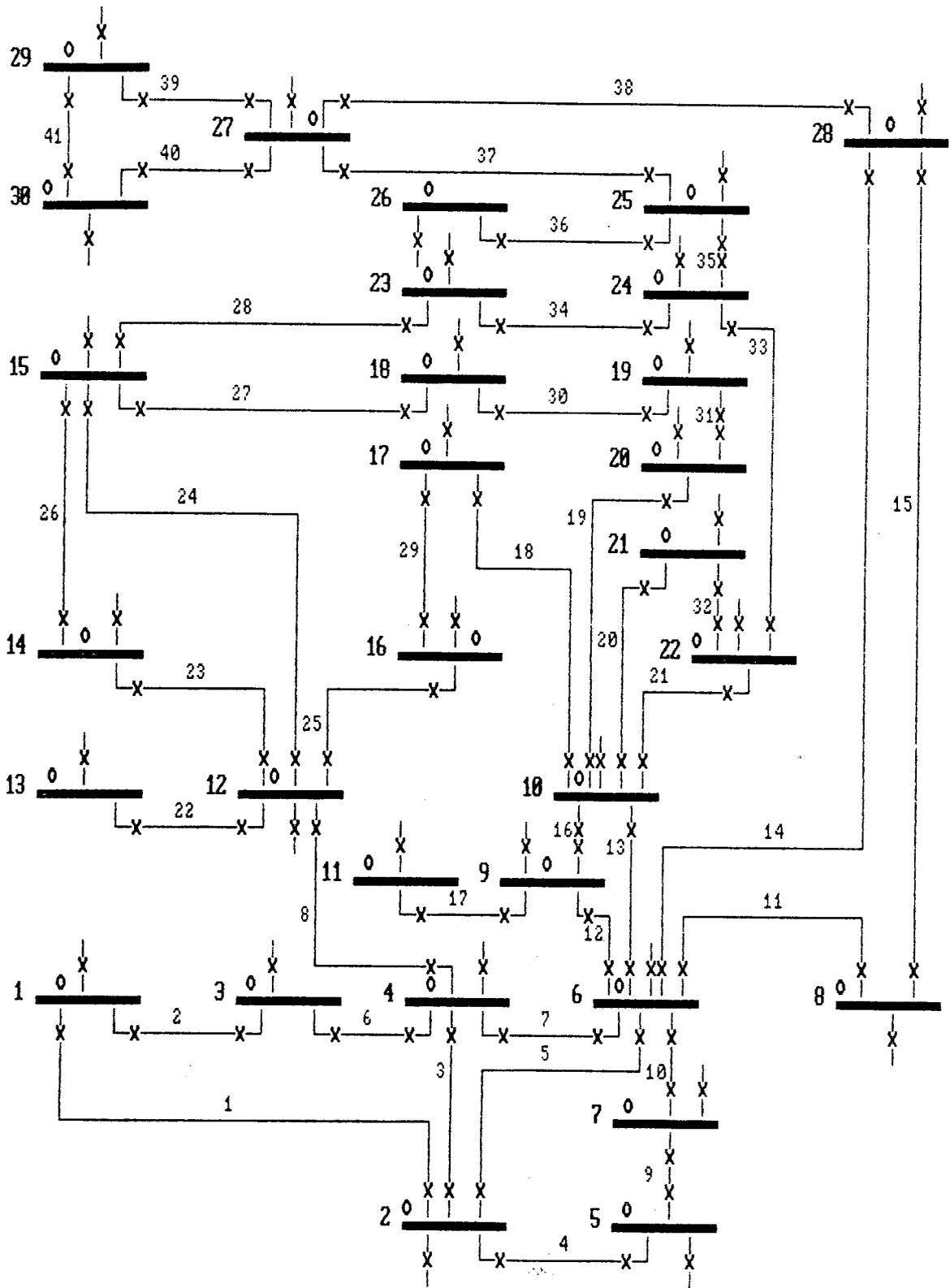


FIGURA 5.7 - Sistema IEEE-30 barras com plano de medição de 254 medidas.

TABELA 5.7 - Resultados do sistemas IEEE de 30 barras com 254 medidas.

MTO = 0,8 MTOR = 1,7 MTOV = 1,0 MTOK = 0,8 MTOKR = 1,7			
Erro Grosseiro	Medidas ativas suspeitas e respectivas notas	Medidas reativas suspeitas e respectivas notas	Tempo (s)
T 3(4- 2) U 3(4- 2)	T 3(4- 2)=-2 P4 =-1	U 3(4- 2)=-2 Q4 =-1	0,916
T 3(2- 4) U 3(2- 4)	T 3(2- 4)=-12 T 5(2- 6)=-6 T 8(12- 4)=-4 P2 =-1	U 3(2- 4)=-1 Q2 =-1	0,856
T 3(4- 2) U 3(4- 2) T 3(2- 4) U 3(2- 4)	T 3(2- 4)=-12 P2=-1 T 3(4- 2)=-2 P4=-1 T 5(2- 6)=-6 T 6(4- 3)=-2 T 7(4- 6)=-2 P2 =-1	U 3(2- 4)=-3 U 3(4- 2)=-2 U 6(4- 3)=-2 U 7(4- 6)=-2 Q2 =-1 Q4 =-1	0,839
P4 Q4	P4=-1	Q4=-1	0,896
T13(6-10)	T 8(4-12)=-4 P6=-1 T12(6- 9)=-2 T13(6-10)=-12 T33(22-24)=-2	U13(6-10)=-1	0,826
V4	-	V4=-1	0,896
T13(10- 6) U13(10- 6)	T13(10- 6)=-2 P10 =-1	U13(10- 6)=-2 Q10 =-1	0,886
T13(6-10) U13(6-10)	T 8(4-12)=-4 T33(22-24)=-2 T12(6- 9)=-2 P6 =-1 T13(6-10)=-12	U11(8- 6)=-1 U13(6-10)=-3 Q6 =-1	0,866
T20(10-21) U20(10-21)	T20(10-21)=-4 P10 =-1	U20(10-21)=-3 Q10 =-1	0,912
T21(22-10) U21(22-10) P24	T21(22-10)=-2 P22 =-1 P24 =-1	U21(22-10)=-2 Q22 =-1	0,903
T16(9-10) U30(19-18) U10(7- 6)	T16(9-10)=-2 P9 =-1	U10(7- 6)=-2 U30(19-18)=-2 Q7 =-1 Q19 =-1	0,899

T18(17-10) P19 U35(24-25) U23(12-14)	T18(17-10)=-2 T23(12-14)=-2 P17 =-1 P19 =-1	U23(12-14)=-3 U35(24-25)=-2 Q12 =-1 Q24 =-1	0,859
T 5(2- 6) U13(10- 6) U16(10- 9)	T 3(2- 4)=-6 P2=-1 T 4(2- 5)=-2 T 5(2- 6)=-12 t 8(4-12)=-4	U 5(2- 6)=-1 U13(10- 6)=-2 U16(10- 9)=-2 Q10 =-1	0,866
P10 P20 P30	P10=-1 P20=-1 P30=-1	-	0,876
Q10 Q20 Q30	-	Q10=-1 Q20=-1 Q30=-1	0,876
T 1(1- 2) T 5(2- 6) U13(6-10) U21(10-22) T34(23-24)	T1(1- 2)=-4 T13(6-10)=-6 T1(2- 1)=-2 T21(10-22)=-6 T2(1- 3)=-2 T34(23-24)=-2 T3(2- 4)=-10 P1 =-1 T4(2- 5)=-2 P2 =-1 T5(2- 6)=-12 P23 =-1 T8(4-12)=-4	U 1(2- 2)=-1 U21(10-22)=-3 U 5(2- 6)=-1 Q6 =-1 U 5(6- 2)=-1 Q10 =-1 U 7(6- 4)=-2 U10(6- 7)=-2 U11(6- 8)=-1 U13(6-10)=-1	0,816
T15(8-28) U38(28-27)	T15(8-28)=-2 P8 =-1	U38(28-27)=-2 Q28 =-1	0,903
P15 T27(15-18)	T27(15-18)=-2	U27(15-18)=-1	0,853
Q15 U27(15-18)	T27(15-18)=-2	U27(15-18)=-1	0,909
T27(15-18) U27(15-18)	T27(15-18)=-4 P15 =-1	U27(15-18)=-3 Q15 =-1	0,859
T27(15-18) P18	T27(15-18)=-4 P18=-1 T27(18-15)=-2 T30(18-19)=-2 P15 =-1	U27(15-18)=-1	0,896
U27(15-18) Q18	T27(15-18)=-2	U27(15-18)=-3 Q18=-1 U27(18-15)=-2 U30(18-19)=-2 Q15 =-1	0,889
T38(27-28) U36(25-26) T31(20-19)	T31(20-19)=-2 T38(27-28)=-4 P20 =-1 P27 =-1	U35(25-24)=-2 U36(25-26)=-3 U38(27-28)=-1 Q25=-1	0,859

5.3 - Análise global dos resultados

Conforme pode ser observado através dos exemplos apresentados na seção 5.2, a redundância de medidas é o fator primordial para o desempenho do método.

No caso de EGs simples, para um sistema que apresenta boa redundância (Figuras 5.2, 5.3, 5.5, 5.6, 5.7) verifica-se que as medidas portadoras de EGs, na grande maioria das vezes, aparecem na lista de suspeitas.

É importante salientar aqui o caso das medidas de fluxo de potência ativa e reativa na linha 3(4-2), para o sistema IEEE-30 barras com 178 medidas (Tabela 5.6), cujo erro não foi detectado. Porém, este mesmo erro não foi apenas detectado, como também identificado no mesmo sistema, porém com 254 medidas (Tabela 5.7) pois apresentou o maior saldo negativo na simulação do mesmo.

Para a identificação das medidas errôneas através da lista de medidas suspeitas, o critério das notas atribuídas às medidas pode ser utilizado, principalmente na ocorrência de uma quantidade pequena de erros grosseiros no sistema. Como pode-se observar através dos exemplos mostrados, na maioria dos casos, a medida portadora de erro grosseiro apresenta o maior saldo negativo.

Valores distintos para o ajuste da margem de tolerância (MTO, MTOK, MTOV, MTOK, MTOKR) para cada tipo de teste é importante embora a variação entre eles seja relativamente pequena.

A ocorrência de medidas críticas e conjuntos críticos impedem a detecção e conseqüentemente a identificação das medi-

das espúrias, devido ao fato de não haver possibilidades de se promover testes de consistência sobre estas medidas. Este fato pode ser comprovado para o caso da medida de injeção de potência ativa e reativa na barra 6 para o plano de medição mostrado na Figura 5.1, cujo erro grosseiro não foi detectado. Verificou-se que estas medidas são críticas. O mesmo acontece para o caso da Figura 5.4, onde um erro grosseiro na medida de injeção de potência ativa e reativa na barra 10 não foi detectado. Verificou-se que esta medida pertence a um conjunto crítico.

Verificou-se que o tempo de processamento é compatível com a pré-filtragem pois, para o exemplo do sistema IEEE-30 barras com plano de medição completo, foi menor do que 1 (um) segundo.

Verificou-se, ainda, através das simulações, que o tempo de processamento cresce mais com o aumento do número de barras do que com o aumento do número de medidas efetuados sobre o sistema.

5.4 - Considerações Finais

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nos testes realizados utilizando os sistemas IEEE-14 barras e IEEE-30 barras com diferentes planos de medição.

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

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 - Conclusões

Este trabalho introduz um procedimento sistemático para ser utilizado na pré-filtragem de medidas para a estimação de estados. Em função da metodologia simples a ser implementada, sem necessidade da utilização de operações com matrizes, o tempo de processamento é relativamente pequeno, comparado ao estimador de estados, o que favorece a sua utilização.

Diferentes sistemas-teste foram utilizados para a simulação de erros de medidas analógicas com o objetivo de analisar o desempenho do método proposto.

Erros grosseiros que variam entre 20 e 30 desvios-padrão foram simulados, e na grande maioria dos casos, houve sucesso na sua detecção. Pelos resultados obtidos, verificou-se que, nos sistemas que possuem um bom plano de medição, a detecção é efetuada corretamente bem como a identificação. A eficiência do método depende muito da redundância de medidas, pois quanto mais alto o valor desta, maior é o número de testes realizados no sistema e conseqüentemente maior a quantidade de medidas que serão testadas.

Em sistemas onde houver baixa redundância, ou mesmo em sistemas de redundância média, com medidas topologicamente mal distribuídas, o método pode falhar, no sentido de não detectar um erro grosseiro de medição em medidas que não participaram de

nenhum teste efetuado sobre o sistema. Assim, conforme o esperado, erros grosseiros em medidas críticas certamente não serão detectados por este método.

A variação da barra inicial na busca (raiz da árvore) pode influenciar na detecção mais fácil de uma ou outra medida, mas basicamente a influência da barra de origem é pequena quando o sistema possuir alta redundância. Esta afirmação é fundamentada nas várias simulações realizadas com o método.

Um erro grosseiro numa medida de fluxo de potência ativa pode se refletir num cálculo de fluxo de potência reativa fora da tolerância, ocasionando desta forma suspeitas sobre as medidas utilizadas no cálculo do fluxo reativo que são isentas de EGs. Isto caracteriza falso-alarme.

Este fato todavia não chega a prejudicar a eficiência do método, desde que o valor da redundância seja relativamente grande, e mais importante que a redundância neste caso, é o problema da relação X/R. Se esta relação for baixa para algumas linhas do sistema, a hipótese do desacoplamento pode falhar.

Verificou-se também a possibilidade de erros grosseiros muito próximos vir a se compensar. Isto pode ocorrer, por exemplo, no caso de erros grosseiros em medidas de fluxo incidentes numa mesma barra onde é realizado um teste do tipo LKC.

Contudo, vale novamente aqui a observação de que, se o plano de medição for bom, estas medidas participarão independentemente em outros testes possibilitando a detecção e possivelmente a identificação dos erros grosseiros.

O tempo de processamento varia diretamente com o número de barras do sistema. Porém, para um mesmo sistema, com plano de medições diferentes a variação no tempo é quase insig-

nificante, conforme pode ser observado através das Tabelas 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7 apresentadas no Capítulo 5.

6.2 - Utilização dos resultados da Pré-Filtragem pelo Estimador de Estados

Um aspecto importante que merece ser destacado é o fato em que nas situações onde erros grosseiros não são detectados na pré-filtragem, os módulos e ângulos calculados pelo método apresentado, podem ser utilizados como valores de partida para o estimador de estados, que é executado em seguida à pré-filtragem.

A utilização destes valores calculados como valores para a inicialização do estimador resultará em muitos casos em economia no número de iterações do estimador de estados, e conseqüentemente no tempo de processamento.

Se por outro lado, houver erros grosseiros, a pré-filtragem poderá fornecer uma lista apropriada de medidas suspeitas ao estimador o qual, através da utilização de metodologias propostas como em [3] [21], procedem ao refinamento desta lista.

6.3 - Sugestões para trabalhos futuros

- Conforme apresentado em [27], existem situações em que a ocorrência simultânea de erros grosseiros e erros topológicos pode vir a prejudicar o desempenho de um método cuja abordagem se refira a apenas um destes itens. Erros topológicos como má configuração de linhas, má configuração de elementos transversais (capacitores e reatores), seccionamento de barramento, afetando o número de barras do sistema ("bus-split"), etc, pode-

riam ser detectados através de uma lógica apropriada para estes casos e serem utilizadas conjuntamente.

- O método utiliza a busca em largura para o seu desenvolvimento. Poderiam ser implementados outros tipos de busca como a busca em profundidade, busca em largura lexicográfica, e analisar o desempenho para cada uma delas na tentativa de melhorar o seu desempenho.

- As notas atribuídas às medidas envolvidas num teste são sempre +1 ou -1, considerando-se apenas o resultado do teste se BOM ou RUIM. Poderia se implementar uma ponderação às medidas baseada no valor da discrepância do teste, ou talvez baseada no número de medidas envolvidas nos testes.

APÊNDICE A

FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA CÁLCULO DAS TENSÕES COMPLEXAS DAS
BARRAS E CÁLCULO DE FLUXOS DE POTÊNCIA

A.1 - Cálculo das tensões complexas nas barras

Considerando uma linha qualquer entre as barras "i" e "j", conforme mostra a Figura A.1 tem-se:

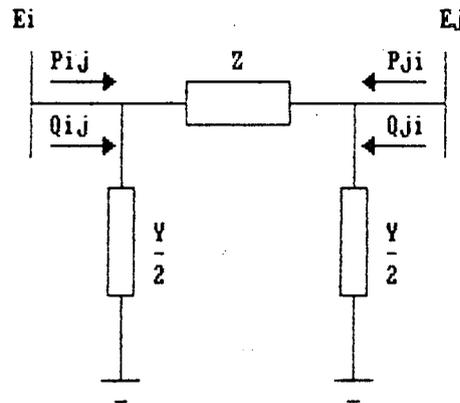


FIGURA A.1 - Modelo PI para linhas de transmissão.

$$S_{ij} = P_{ij} + j Q_{ij} \quad (\text{A.1})$$

$$S_{ij} = E_i I_{ij}^* = E_i \left(\frac{E_i Y}{2} + \frac{E_{ij}}{Z} \right)^* \quad (\text{A.2})$$

$$P_{ij} - j Q_{ij} = |E_i|^2 \frac{Y}{2} + E_i^* \frac{E_{ij}}{Z} \quad (\text{A.3})$$

mas:

$$|E_i| = V_i$$

$$E_{ij} = Z \frac{(P_{ij} - jQ_{ij})}{E_i^*} - \frac{V_i^2 Y}{2 E_i^*} \quad (\text{A.4})$$

para $i=0$: $E_i = E_i^* = V_i / 0$ (A.5)

Substituindo A.5 em A.4, obtem-se:

$$E_{ij} = Z \frac{(P_{ij} - jQ_{ij})}{V_i} - \frac{V_i Y}{2} \quad (\text{A.6})$$

A.2 - Cálculo dos fluxos de potência ativa e reativa

Da equação A.2 tem-se:

$$S_{ij} = E_i \left(-E_{ij}^* \frac{jY}{2} + \frac{E_{ij}^*}{Z^*} \right) \quad (\text{A.7})$$

$$S_{ij} = -j V_i^2 \frac{Y}{2} + E_i \frac{(E_i^* - E_{j}^*)}{Z^*} \quad (\text{A.8})$$

$$S_{ij} = \frac{V_i^2 - V_i V_j / \delta_{ij}}{Z^*} - \frac{j Y V_i^2}{2} \quad (\text{A.9})$$

Multiplicando o numerador e o denominador do primeiro termo da equação A.9 por:

$$Z = R + j X$$

e considerando:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{X}{R} \quad (\text{A.10})$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{R}{X} \quad (\text{A.11})$$

$$S_{ij} = \frac{V_i^2 \angle 90 - \theta_{ij}}{|z|} - \frac{V_i V_j \angle 90 + \delta_{ij} - \theta_{ij}}{|z|} - \frac{j Y V_i^2}{2} \quad (\text{A.12})$$

Sabendo-se que:

$$\operatorname{Re} \{ S_{ij} \} = P_{ij}$$

$$\operatorname{Im} \{ S_{ij} \} = Q_{ij}$$

$$\cos(\alpha + 90) = -\operatorname{sen} \alpha$$

$$\cos(90 - \alpha) = \operatorname{sen} \alpha$$

$$\operatorname{sen}(90 - \alpha) = \cos \alpha$$

$$\operatorname{sen}(90 + \alpha) = \cos \alpha$$

$$P_{ij} = \frac{V_i^2}{|z|} \operatorname{sen} \theta_{ij} - \frac{V_i V_j}{|z|} \operatorname{sen}(\theta_{ij} - \delta_{ij}) \quad (\text{A.13})$$

$$Q_{ij} = \frac{-V_i V_j}{|z|} \cos(\delta_{ij} - \theta_{ij}) + V_i^2 \left(\frac{\cos \theta_{ij}}{|z|} - \frac{Y}{2} \right)$$

(A.14)

APÊNDICE B

DERIVADAS PARCIAIS DE $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ E $V_{ij} = V_i - V_j$ COM RESPEITO A P_{ij} E Q_{ij}

B.1 - Derivada do ângulo δ_{ij} em relação a P_{ij}

Considerando a Figura B.1, tem-se:

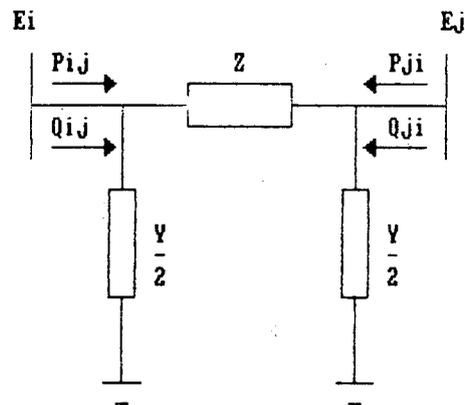


FIGURA B.1 - Modelo PI para linha de transmissão.

$$\delta_{ij} = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\operatorname{Im}(V_i - E_{ij})}{\operatorname{Re}(V_i - E_{ij})} \quad (\text{B.1})$$

$$E_{ij} = \left(\frac{R P_{ij}}{V_i} + \frac{X Q_{ij}}{V_i} + \frac{X V_i Y}{2} \right) + j \left(\frac{X P_{ij}}{V_i} - \frac{R Q_{ij}}{V_i} - \frac{R V_i Y}{2} \right)$$

(B.2)

Fazendo:

$$K = \frac{R P_{ij}}{V_i} + \frac{X Q_{ij}}{V_i} + \frac{X V_i Y}{2} \quad (\text{B.3})$$

$$L = \frac{X P_{ij}}{V_i} - \frac{R Q_{ij}}{V_i} - \frac{R V_i Y}{2} \quad (\text{B.4})$$

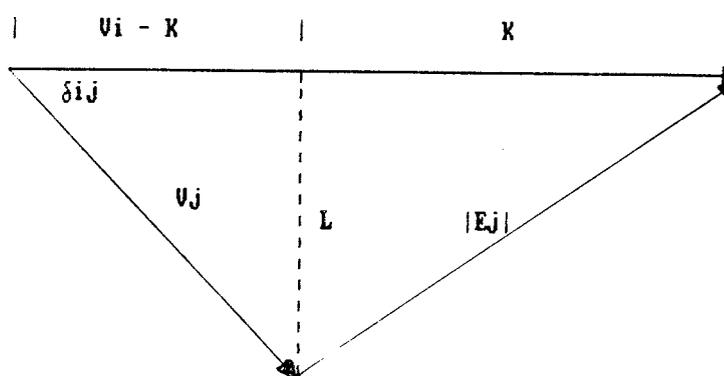


FIGURA B.2 - Diagrama fasorial.

Em relação a Figura B.2:

$$V_j = \sqrt{(V_i - K)^2 + L^2} \quad (\text{B.5})$$

$$\delta_{ij} = \text{tg}^{-1} \frac{L}{(V_i - K)} \quad (\text{B.6})$$

Fazendo:

$$u \triangleq \frac{L}{(V_i - K)}$$

$$\frac{\partial \delta_{ij}}{\partial P_{ij}} = \frac{\partial \delta_{ij}}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial P_{ij}} = \frac{\partial \delta_{ij}}{\partial u} \left(\frac{\partial u}{\partial L} \frac{\partial L}{\partial P_{ij}} + \frac{\partial u}{\partial K} \frac{\partial K}{\partial P_{ij}} \right) \quad (B.7)$$

$$\frac{\partial \delta_{ij}}{\partial u} = \frac{(V_i - K)^2}{L^2 + (V_i - K)^2} \quad (B.9)$$

$$\frac{\partial U}{\partial L} = \frac{1}{(V_i - K)} \quad (B.10)$$

$$\frac{\partial U}{\partial K} = \frac{L}{(V_i - K)^2} \quad (B.11)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{ij}} = \frac{X}{V_i} \triangleq M \quad (B.12)$$

$$\frac{\partial K}{\partial Q_{ij}} = \frac{R}{V_i} \triangleq N \quad (B.13)$$

Substituindo B.9, B.10, B.11, B.12, B.13 em B.8, tem-

se:

$$\frac{\partial \delta_{ij}}{\partial P_{ij}} = \frac{(V_i - K)^2}{L^2 + (V_i - K)^2} \left(\frac{M}{V_i - K} + \frac{LN}{(V_i - K)^2} \right)$$

$$\frac{\partial \delta_{ij}}{P_{ij}} = \frac{(V_i - K) M + LN}{V_j^2} \quad (B.14)$$

B.2 - Derivada do ângulo δ_{ij} em relação a Q_{ij}

$$\frac{\partial \delta_{ij}}{\partial Q_{ij}} = \frac{\partial \delta_{ij}}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial Q_{ij}} = \frac{\partial \delta_{ij}}{\partial u} \left(\frac{\partial u}{\partial L} \frac{\partial L}{\partial Q_{ij}} + \frac{\partial u}{\partial K} \frac{\partial K}{\partial Q_{ij}} \right) \quad (\text{B.15})$$

$$\frac{\partial L}{\partial Q_{ij}} = - \frac{R}{V_i} = -N \quad (\text{B.16})$$

$$\frac{\partial K}{\partial Q_{ij}} = \frac{R}{V_i} = M \quad (\text{B.17})$$

Substituindo B.10, B.11, B.16, B.17 em B.15, tem-se:

$$\frac{\partial \delta_{ij}}{\partial Q_{ij}} = - \frac{[(V_i - K) N - LM]}{V_j^2} \quad (\text{B.18})$$

B.3 - Derivada de V_{ij} em relação a P_{ij}

Da Figura B.2, tem-se:

$$V_{ij} = V_i - V_j \quad (\text{B.19})$$

Substituindo B.5 em B.19, tem-se:

$$V_{ij} = V_i - \sqrt{(V_i - K)^2 + L^2} \quad (\text{B.20})$$

$$\frac{\partial V_{ij}}{\partial P_{ij}} = - \frac{\partial \sqrt{(V_i - K)^2 + L^2}}{\partial P_{ij}} \quad (\text{B.21})$$

Chamando:

$$W = (V_i - K)^2 + L^2 \quad (\text{B.22})$$

$$\frac{\partial V_{ij}}{\partial P_{ij}} = - \frac{\partial \sqrt{W}}{\partial W} \left(\frac{\partial W}{\partial K} \frac{\partial K}{\partial P_{ij}} + \frac{\partial W}{\partial L} \frac{\partial L}{\partial P_{ij}} \right) \quad (\text{B.23})$$

$$\frac{\partial \sqrt{W}}{\partial W} = \frac{1}{2\sqrt{W}} = \frac{1}{2V_j} \quad (\text{B.24})$$

$$\frac{\partial W}{\partial K} = -2 (V_i - K) \quad (\text{B.25})$$

$$\frac{\partial W}{\partial L} = 2L \quad (\text{B.26})$$

Substituindo B.12, B.13, B.24, B.25, B.26 em B.23,

tem-se:

$$\frac{\partial V_{ij}}{\partial P_{ij}} = \frac{1}{V_j} [(V_i - K) N - LM] \quad (\text{B.27})$$

B.4 - Derivada de V_{ij} em relação a Q_{ij}

$$\frac{\partial V_{ij}}{\partial Q_{ij}} = - \frac{\partial \sqrt{(V_i - K)^2 + L^2}}{\partial Q_{ij}} \quad (\text{B.28})$$

$$\frac{\partial V_{ij}}{\partial Q_{ij}} = - \frac{\partial \sqrt{W}}{\partial W} \left(\frac{\partial W}{\partial K} \frac{\partial K}{\partial Q_{ij}} + \frac{\partial W}{\partial L} \frac{\partial L}{\partial Q_{ij}} \right) \quad (\text{B.29})$$

Substituindo B.16, B.17, B.24, B.25, B.26 em B.29,

tem-se:

$$\frac{\partial V_{ij}}{\partial Q_{ij}} = \frac{[(V_i - K) M + LN]}{V_j} \quad (\text{B.30})$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Bonanomi, P.; Gramberg, G.; Power System Validation and State Calculation by Network Search Techniques, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol.Pas-102, No.1, Janeiro 1983.
- [2] De Souza, W.; Um algoritmo para Pré-Filtragem de Medidas com Erros Grosseiros em Sistemas de Potência, Dissertação de Mestrado, UFSC, 1981.
- [3] Do Amaral, S.; Métodos para processamento de erros grosseiros múltiplos em Estimadores de Estado Sequenciais-Ortogonais, Dissertação de Mestrado, UFSC, 1987.
- [4] Dopazo, J. F.; Power System Security, American Electric Power Service Corporation 2 Broadway, New York.
- [5] Dy Liacco, T.E.; System Security: the computer role, IEEE Spectrum, Junho 1978, pag.43-50
- [6] Falcão, D.M.; de Assis S. M.; Linear Programming State Estimation: Error Analysis and Gross Error Identification, IEEE Transaction on Power Systems, Vol.3, No.3, Ago.88.
- [7] Garcia, A.; Monticelli A.; Abreu P.; Fast Decoupled State Estimation and Bad Data Processing, IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol.Pas-98, No.5, Set/Out 1979.
- [8] Handschin, E.; Scheweppe, F. C.; Kohlas, J.; Fiechter, A.; Bad Data Analysis for Power System State Estimation, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol.Pas-94, No.2, Mar/Abril 1975.

- [9] Lugtu, R. L.; Hackett, D. F.; Liu, K. C.; Might, D. P.; Power System State Estimation: Detection of Topological Errors, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol.Pas-99, No.6, Nov/Dez 1980.
- [10] Merryll, H. M.; Scheweppe, F. C.; Bad Data Suppression in Power System Static State Estimation, IEEE Summer Meeting and International Symposium on High Power Testing, Ju-71, Printing Mai-71
- [11] Monticelli, A. J.; Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica, Editora Edgar Blucher Ltda, 1983.
- [12] Saahba, M.; A Method for Plausibility checks and Data Validation in Power Systems, Vol.3, No.1, Fev.1988.
- [13] Schweppe, F. C.; Handschin, E. J.; Static State Estimation in Electric Power Systems, Proceedings of the IEEE, Vol.62, No.7, Julho 74.
- [14] Shultz, R. D.; Smith, R. A.; Witthuhn, L. L.; Suspected Bad Data Substitution Using a Search Emulation Procedure, Electric Power Systems Research, 13, 1987.
- [15] Garcia, A. V.; Monticelli, A. J.; 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, SP, 1982.
- [16] Szwarcfiter, J. L.; Grafos e Algoritmos Computacionais, segunda edição, Editora Campus, Rio de Janeiro, 1986.

- [17] Meyer, P. L.; Probabilidade: Aplicações à Estatística, Editora Ao Livro Técnico, 1973.
- [18] Quintana, V.H.; Simões Costa, A.; Mier, M.; Bad Data Detection and Identification Techniques Using Estimation Orthogonal Methods, IEEE Transaction on Pas, Vol.Pas-101, No.9, 1982.
- [19] Dopazo, J. F.; Klitin, O.A.; Van Slyck, L. S.; State Estimation for Power Systems - Detection and Identification of Gross Measurements Errors, paper x2, PICA CONFERENCE, Minneapolis, 1973.
- [20] Tanaka, M. R.; Garcia, A. V.; Estimação Estática de Estado em Sistemas de Energia Elétrica: Discussão sobre os Limiares de Detecção e Identificação de Medidas com Erros Grosseiros, Anais do 6o. Congresso Brasileiro de Automática, Belo Horizonte, 1986.
- [21] Mili, L.; Van Cutsem, T.; Ribbens-Pavella, M.; Hypotesis Testing Identification - A New Method as Bad Data Analysis in Power Systems State Estimation, IEEE Transaction on PAS, Vol. PAS - 103, n. 11, 1984.
- [22] Clements, K. A.; Wollemborg, B. F.; An Algorithm for Observability determination in Power System State Estimation, IEEE PES Summer Meeting, San Francisco, Calif., julho 75.
- [23] Simões Costa, A.; Mandel, A.; A Abordagem Topológica para Observabilidade de Sistemas de Potência: Teoria e um

- Algoritmo, Anais do 4o. Congresso Brasileiro de Automática, Campinas, SP, 1982.
- [24] Piazza, T. S.; Aplicação de Métodos Combinatórios a Estimação de Estados de Sistemas de Potência: Determinação de Medidas e Conjuntos Críticos e Alocação de Pseudo-medidas, Dissertação de Mestrado, UFSC, 1989.
- [25] Simões Costa, A.; Determinação de Conjuntos Críticos de Medidas na Estimação de Estados em Sistemas de Potência, Anais do 7o. Congresso Brasileiro de Automática, Belém, Pará, 1988.
- [26] Larson, R. E.; Tinney, W. F.; Poschon, J.; State Estimation in Power Systems, PART I: Theory and Feasibility, IEEE Transaction on PA&S, vol. PAS-89, n. 3, 1970.
- [27] Leão, J. A.; Erros Topológicos na Estimação de Estados em Sistemas de Potência: Abordagem Geométrica, Detectabilidade e Identificação, Dissertação de Mestrado, UFSC, 1990.
- [28] Deo, N.; Graph theory with application to engineering and computer science, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1974.
- [29] Dopazo, J. F.; Klitin, O. A.; Van Slyck, L. S.; State Calculation of Power Systems From Line Flow Measurements, PART II, IEEE PAS-91, n. 1, pag. 146-151, fevereiro de 1972.
- [30] Amaral, S.; Simões Costa, A. J. A.; Identificação de Erros Grosseiros Múltiplos Via Testes de Hipóteses e Técnicas

Ortogonais, Anais do 7o. Congresso Brasileiro de Automática, 837-843, agosto de 1988.