

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

UM ALGORITMO PARA PRÉ-FILTRAGEM DE MEDIDAS COM ERROS GROSSEIROS  
EM SISTEMA DE POTÊNCIA

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

WILIAN DE SOUZA

FLORIANÓPOLIS, JUNHO, 1981

UM ALGORÍTMO PARA PRÉ-FILTRAGEM DE  
MEDIDAS COM ERROS GROSSEIROS EM SISTEMA DE POTÊNCIA

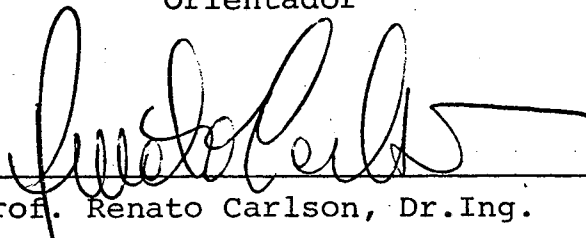
Wilians de Souza

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



Prof. Rajamani Doraiswami, Ph.D.

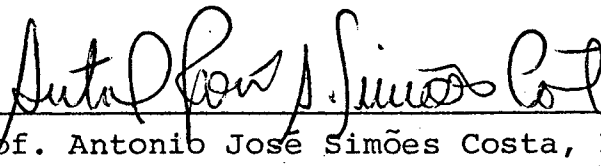
Orientador



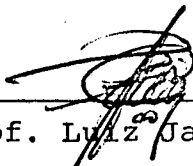
Prof. Renato Carlson, Dr.Ing.

Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

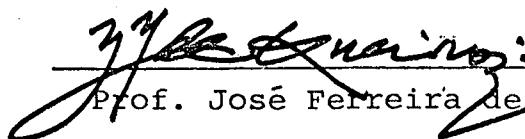
APRESENTADA PERANTE A BANCA EXAMINADORA COMPOSTA DOS PROFESSORES:



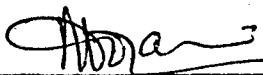
Prof. Antonio José Simões Costa, Ph.D.



Prof. Luiz Jairo Branco Machado, Dr.Ing.



Prof. José Ferreira de Queiróz, Ph.D.



Prof. Rajamani Doraiswami, Ph.D.

À Maria Beatriz Piccoli Corrêa  
Dias e Souza minha esposa.

Ao Fernando Corrêa Dias  
de Souza meu filho.

Aos meus pais

**AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Rajamani Doraiswami pela amizade e inestimável ajuda prestada na orientação deste trabalho.

A todos os professores e colegas da Pós-Graduação que, de uma ou de outra forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Especialmente a Júlio Cesar Portella Silveira pelas discussões e companhia e incentivo.

A Iara Torquato Dutra e Nazide Nilma Martins pela datilografia.

A Universidade Federal de Santa Catarina pelo apoio técnico e a Universidade Federal do R.Grande do Norte, CAPES, Eletrobrás pelo apoio financeiro.

## R E S U M O

Um algoritmo para pré-filtragem de medidas de tal modo a detectar e identificar as medidas com erros grosseiros, é apresentado. As medidas são restritas aos fluxos e injeções de potências ativas e reativas.

O algoritmo consiste em estimar as variáveis de estado, diferenças de ângulo e de magnitude de tensão, através das medidas e verificar se as grandezas estimadas satisfazem um conjunto de equações algébricas derivadas da topologia da rede.

As equações de medidas são linearizados, e um termo que é função linear dos estados é obtido.

**A B S T R A C T**

An algorithm for pre-processing the measurements so as to detect and identify the gross measurement errors is presented. The measurements are restricted to be active and reactive power flows, active and reactive power injections.

The algorithm estimates the angle differences and voltage magnitude differences by processing the measurements.

Next, it verifies if the estimated quantities satisfy a set of algebraic equations which are derived from the network topology.

The measurement equations are linearized and a term which is a linear function of the states is obtained.



## S U M Á R I O

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 - Introdução .....	1
1.2 - Revisão Bibliográfica .....	2
1.3 - Objetivos do Trabalho .....	3
1.4 - Organização do Trabalho .....	4
 <b>CAPÍTULO 2 - NOÇÕES SOBRE ESTIMAÇÃO ESTÁTICA DE ESTADO</b>	 <b>5</b>
2.1 - Introdução .....	5
2.2 - Etapas da Estimação Estática de Estado .....	5
2.2.1 - Sistema de medidas .....	5
2.2.2 - Pré-filtragem .....	8
2.2.3 - Estimação de Estado .....	9
2.2.4 - Método dos Mínimos Quadrados Ponderados .....	9
2.2.5 - Modelo do Sistema de Transmissão .....	11
2.2.6 - Detecção de Medidas com Erros Grosseiros .....	14
2.2.7 - Identificação de Medidas com Erros Grosseiros .	16
 <b>CAPÍTULO 3 - PRÉ-FILTRAGEM .....</b>	 <b>19</b>
3.1 - Introdução .....	19
3.2 - Esquema Geral.....	19
3.3 - Modelagem das Medidas .....	22
3.3.1 - As medidas e os estados .....	22

	x
3.3.2 - As equações das medidas .....	24
3.4 - Algoritmo de Pré-filtragem .....	27
<b>CAPÍTULO 4 - DESEMPENHO DO ALGORITMO PRÉ-FILTRAGEM .....</b>	<b>31</b>
4.1 - Introdução .....	31
4.2 - Simulação do Sistema A .....	31
4.2.1 - Pré-filtragem das medidas contendo fluxos e injeções de potência ativa .....	37
4.2.2 - Pré-filtragem das medidas contendo fluxos e injeções de potência reativa .....	42
4.3 - Simulação do Sistema B .....	46
4.3.1 - Pré-filtragem considerando-se medidas de Potência ativa .....	51
4.3.2 - Pré-filtragem considerando-se medidas de Potência reativa .....	63
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....</b>	<b>74</b>
5.1 - Introdução .....	74
5.2 - Conclusões .....	74
5.3 - Sugestões para as futuras pesquisas .....	75
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>77</b>

# C A P Í T U L O I

## INTRODUÇÃO

### 1.1 - Introdução

O objetivo principal do sistema de potência é su  
prir a cargas da forma mais econômica e com o máximo de seguran  
ça.

Estes dois aspectos devem ser levados em conta tan-  
to pelos setores de planejamento quanto pelos setores de opera-  
ção. No estágio de planejamento, o objetivo é definir os meios  
necessários à geração e transmissão. Na operação, por outro la-  
do, procura-se garantir em todos os instantes o suprimento e con-  
fiável de energia elétrica aos consumidores.

Nos modernos centros de controle, a avaliação da  
segurança do sistema é efetuada em tempo real.

Esta avaliação depende muito da qualidade das infor-  
mações sobre o estado do sistema, bem como da disponibilidade des-  
tas informações.

Para que os objetivos acima possam ser atingidos,  
é necessário o uso de técnicas de estimação de estado que forne-  
cem as informações necessárias aos programas de avaliação de se-  
gurança.

O estimador de estado faz um processamento das in-  
formações telemidas, detectando e identificando as medidas por

tadoras de erros grosseiros.

O estimador de estado deve ser rápido e confiável de maneira a fornecer os dados para a avaliação de segurança.

## 1.2 - Revisão Bibliográfica

Um dos primeiros estudos divulgados sobre estimação de estado em sistema de potência dada de 1967 [13]. Em 1968/1969 foram publicados sobre o assunto, em geral, tratavam-se de publicações de carácter restrito à nível de instituições de empresas [14]-[16]. De 1970 em diante, vários foram os trabalhos publicados na área, como por exemplo as referências [1], [3]-[11] [17], [18].

Embora muitos estudos tenham sido feitos sobre estimação de estado em sistemas de potência, poucos trabalhos tratam do problema de pré-processamento de medidas. Na literatura especializada, encontrou-se referências à pré-filtragem apenas nos trabalhos de Schweppe e Handschin [17] e Handschin e Bongers [4]. É sugerido o uso de comparações lógicas simples entre medidas redundantes e testes de limites como meios de se processar à pré-filtragem.

Já os problemas de detecção e identificação de erros grosseiros mereceram mais atenção na literatura. O método consagrado para a detecção de erros grosseiros consiste em comparar a soma dos quadrados dos resíduos com um limiar que é obtido da distribuição do qui-quadrado [8] [14] [18]. Quanto à identificação de erros grosseiros, a procura do máximo resíduo normalizado é a técnica geralmente usada [8] [18].

Rezende [5] aplica uma técnica aproximada para de tecção e identificação de erros grosseiros associados com medidas de potência ativa que é baseada na estimação das diferenças de ângulos de tensão. Em seguida, é verificada se as quantidades estimadas satisfazem a certas equações algébricas.

Neste trabalho, o algoritmo proposto em [5] é extendido para a manipulação de medidas de potência reativa e então adaptada para ser usado como um método de pré-filtragem de medidas.

### 1.3 - Objetivos do Trabalho

O objetivo deste trabalho é propor um algoritmo de pré-filtragem de medidas, cuja utilização visa a reduzir o esforço de computação dedicado ao processamento de erros grosseiros.

O algoritmo de pré-filtragem proposto tem como variável de estado as diferenças de ângulos de tensão nas barras e as diferenças de magnitude de tensão entre barras conectadas.

Uma estimativa rápida dos estados do pré-filtro é feita usando-se as medidas de fluxo de potência ativa e reativa, injeções de potência ativa e reativa e os parâmetros do sistema de potência.

Os estados estimados pelo pré-filtro devem ser testados pela não-satisfação de um conjunto de desigualdades.

Os erros grosseiros são identificados usando-se a matriz de incidência de laços e o somatório dos fluxos de potência nas barras.

#### 1.4 - Organização do Trabalho

No Capítulo 2 apresentam-se noções de pré-filtragem, estimação de estado, detecção e identificação de medidas.

No capítulo 3 apresenta-se um esquema geral para um filtro. Ainda neste capítulo aplica-se o esquema geral para a pré-filtragem de medidas com erros grosseiros em sistemas de potência.

No Capítulo 4 apresentam-se resultados dos testes realizados com o algoritmo de pré-filtragem proposto.

No Capítulo 5 são apresentadas conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

## C A P Í T U L O    I I

### NOÇÕES SOBRE ESTIMAÇÃO ESTÁTICA DE ESTADO

#### 2.1 - Introdução

Com o advento da operação do sistema de potência a través de computadores, a necessidade de uma técnica confiável de estimação de estado tem sido intensamente sentida. O algoritmo de estimação de estado deve apresentar características de simplicidade e velocidade de execução compatíveis com as aplicações de controle em tempo real. O estimador estático de estado em sistemas de potência pode ser considerado como uma generalização do problema clássico de fluxo de potência [1].

#### 2.2 - Etapas da estimação estática de estado

##### 2.2.1 - Sistema de medidas

A etapa inicial do processo que envolve a estimação estática de estado é a coleta de medidas, ou seja, a maneira como são feitas as medidas.

O conjunto de medidas tomadas pelo sistema de medição deve cobrir uma parte observável do sistema. Um sistema de potência é dito observável no que diz respeito a estimação de estado se são disponíveis informações suficientes para se estimar o estado nas barras. Estas informações são: operacionais e topológicas [2]. As infor

mações topológicas, também chamadas de digitais, são constituídas por "status" dos disjuntores e chaves trifásicas, parâmetros das linhas de transmissão e dos transformadores. As informações operacionais, chamadas também de analógicas, são injeções de potência, magnitudes das tensões nas barras e fluxos de potência [2]. Para um sistema de potência considerando-se que  $N$  é o número de barras e  $m$  é o número de medidas coletadas, a redundância das medidas é definida como:

$$\eta = \frac{m}{2N-1} \quad (2.1)$$

ou

$$\eta = \frac{m}{n} \quad (2.2)$$

onde  $n \triangleq 2N-1$ .

As medidas operacionais não são coletadas em todas as barras e linhas do sistema, porém são coletadas de tal modo a existir redundância. A redundância é importante e usada em processo de pré-filtragem a fim de se obter a estimativa do estado do sistema de potência com maior precisão, bem como na detecção e identificação de dados errados.

A redundância das medidas em geral assume valores entre 1 e 2. Pelo estudo feito em [3], mostra-se que em torno de 1,7 tem-se um bom ganho em termos de estimação de estado e conclui-se que acima deste valor, para o exemplo estudado em [3], não há ganho substancial. Portanto, a duplicação de medidas, além de custar mais, se torna desnecessária.

Na figura 1 tem-se um diagrama com as etapas que envolvem o processo de estimação estática de estado.



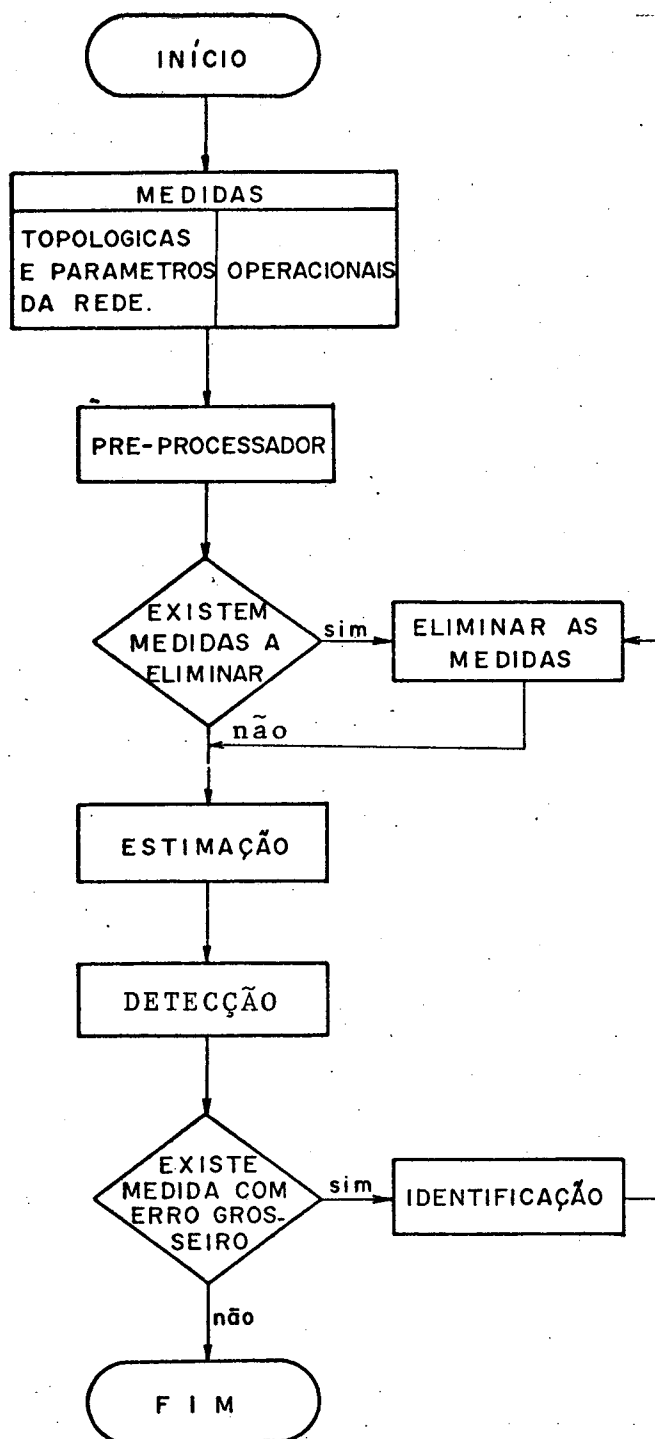


Fig. 1 - Fluxograma da estimação estática de estado.

### 2.2.2 - Pré-Filtragem

Tendo sido feita a coleta de medidas através de um sistema de medição conveniente, de maneira a se obter um sistema observável e também que contenha uma redundância satisfatória de medidas, faz-se então uma pré-filtragem destas medidas. Esta pré-filtragem tem por objetivo eliminar ou modificar erros grosseiros provenientes da falha dos aparelhos de medição, linhas desligadas, ou outras contingências não previstas.

É feita esta pré-filtragem atualmente através de simples testes de limites ou usando-se experiência, porém esta pré-filtragem geralmente não detecta erros de magnitude inferior a  $[4]$ , onde  $\sigma$  é o desvio padrão da medida.

Em [5] foi apresentado um método de detecção e identificação que pode ser adaptado para pré-filtragem, porém só é aplicável para medidas de potência ativa.

Salienta-se aqui a importância de se ter um processo de pré-filtragem eficiente tendo em vista que, após a estimação de estado os erros grosseiros são identificados, modificados ou eliminados um de cada vez. Isto faz com que se faça o cálculo completo do estimador, tantas vezes quantas forem os erros grosseiros.

Portanto, quanto melhor for conseguido com a pré-filtragem, mais eficientes e rápidos se tornarão as etapas posteriores, que podem envolver um esforço de computação muito grande, pois a identificação requer cálculo com multiplicação e inversão de matrizes.

### 2.2.3 - Estimação de Estado

O algoritmo de estimação de estado tem como objetivo determinar estimativas para as magnitudes das tensões, bem como os ângulos nos barramentos, a partir de um conjunto de medidas realizadas na parte observável do sistema.

A estimação de estado é um problema vizinho ao cálculo de fluxo de potência. Nos dois casos procura-se determinar um vetor de estado  $\underline{x}$  de um sistema de potência. A rigor, contudo, há uma diferença fundamental. No estudo de fluxo de potência as injeções nas barras são dados do problema, que são supostos verdadeiros, enquanto que na estimação de estado elas são resultados das medições que carregam consigo erros e imprecisões.

A cada tipo de medição disponível (sejam injeção de potência ativa, injeção de potência reativa, fluxo de potência ativa, ou fluxo de potência reativa) corresponde uma equação que traduz o modelo matemático da rede. Isto acarreta uma redundância dada pelas expressões (2.1) ou (2.2).

### 2.2.4 - Método dos Mínimos Quadrados Ponderados

Seja um sistema de potência para o qual se conhece a sua configuração e parâmetros. As medições realizáveis em tempo real, os erros aleatórios e o estado do sistema pode ser relacionados [6], [7] pela expressão

$$\underline{z}^m = \underline{h}(\underline{x}_v) + \underline{v} \quad (2.3)$$

onde

$\underline{z}^m$  : vetor das medidas ( $m \times 1$ )

$\underline{h}(x)$  : vetor das funções não lineares ( $m \times 1$ )

$\underline{x}$  : vetor estado do sistema ( $n \times 1$ )

$\underline{x}_v$  : vetor de estado verdadeiro do sistema ( $n \times 1$ )

$\underline{v}$  : vetor dos erros relacionados com as medidas ( $m \times 1$ )

$m$  : número de medidas

$N$  : número de barras do sistema

$n$  : número de variáveis de estado =  $(2N-1)$

Os símbolos sublinhados denotam vetores.

A técnica dos mínimos quadrados consiste em obter uma estimativa de  $\underline{x}_v$  de modo que a soma quadrática dos resíduos de estimação seja mínima. Ou seja, deseja-se minimizar a função custo:

$$J(\underline{x}) = \underline{r}^t W^{-1} \underline{r} = [\underline{z}^m - \underline{h}(\underline{x})]^t \cdot W^{-1} \cdot [\underline{z}^m - \underline{h}(\underline{x})] \quad (2.4)$$

onde

$$\underline{r} \triangleq [\underline{z}^m - \underline{h}(\underline{x})] \quad (2.5)$$

é o vetor dos resíduos de dimensão  $m \times 1$  e  $W^{-1}$  é a matriz covariância das medidas, ou seja, cada medida é ponderada de acordo com a precisão dos instrumentos e do sistema de telecomunicações [5].

O resultado da minimização é bastante conhecido e apresentado em [6], e a estimativa  $\hat{\underline{x}}$  é obtida iterativamente, devido às não-linearidades.

$$\underline{x}^{v-1} = \underline{x}^v + [H(\underline{x}^v)^t \cdot W^{-1} \cdot H(\underline{x}^v)]^{-1} [H^t(\underline{x}^v) \cdot W^{-1}] \Delta Z(\underline{x}^v) \quad (2.6)$$

onde

$$\Delta Z(\underline{x}^v) = \underline{z}^m - \underline{h}(\underline{x}^v)$$

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

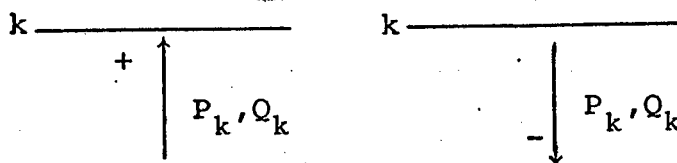
A estimativa  $\hat{\underline{x}}$  é o valor que se obtém de  $\underline{x}^{v-1}$ , quando o processo iterativo tenha convergido.

### 2.2.5 - Modelo do Sistema de Transmissão [6]

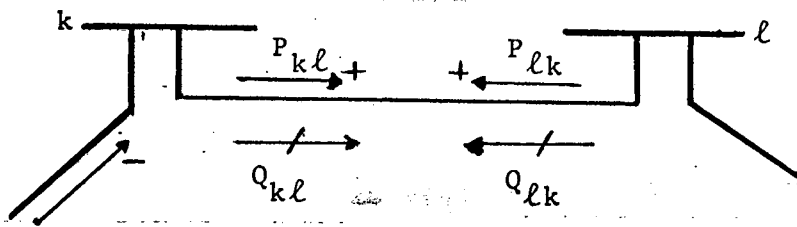
Usar-se-ã para representar as linhas de transmissão do sistema de potência, o circuito equivalente  $\pi$ .

#### a - Convenções

a.1 - As injeções de potência ativa e reativa são positivas quando entrando na barra.



a.2 - Os fluxos de potências ativa e reativa são positivos quando estão saindo da barra.



a.3 - Dada uma barra  $k$ , define-se o conjunto

$\Omega_k$  - conjunto das barras que se ligam diretamente à barra  $k$ .

a.4 - A cada barra (ou nó)  $k$  qualquer, associar-se-ã quatro variáveis reais:

$V_k$  - módulo de tensão nodal.

$\theta_k$  - ângulo de tensão nodal.

$P_k$  - injeção líquida de potência ativa.

$Q_k$  - injeção líquida de potência reativa.

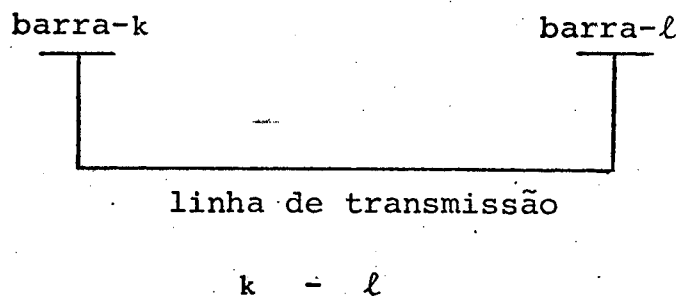


Fig. 2.a - Linha de transmissão  $k-l$ .

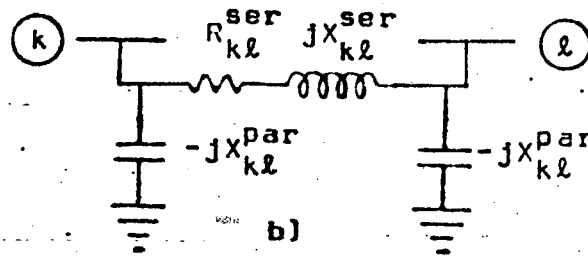


Fig. 2.b - Circuito  $\pi$  - equivalente para a linha da Fig. 2.2, onde:

ser - indica série

par - paralelo.

Por comodidade para se escrever as equa es do modelo, ao invés de impedância, resistências e reatâncias, trabalha-se com admitâncias, condutâncias e susceptâncias (Fig. 3), as quais

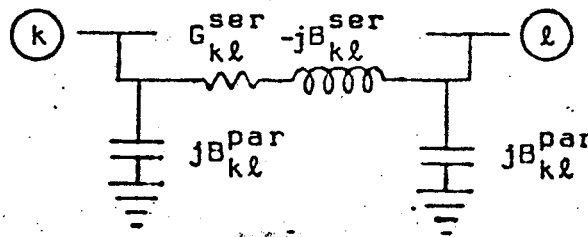


Fig. 3 - Circuito equivalente de linha com susceptâncias e condutâncias.

são dadas por:

$$G_{kl}^{ser} = R_{kl}^{ser} / \left[ (R_{kl}^{ser})^2 + (X_{kl}^{ser})^2 \right]$$

$$B_{kl}^{ser} = X_{kl}^{ser} / \left[ (R_{kl}^{ser})^2 + (X_{kl}^{ser})^2 \right]$$

$$B_{kl}^{par} = 1/X_{kl}^{par}$$

b - Equações de fluxos e injeções de potência.

b.1 - Fluxos de potência ativa e reativa  $P_{kl}$  e  $Q_{kl}$

$$P_{kl} = V_k^2 G_k^{ser} - V_k V_l G_{kl}^{ser} \cos(\theta_k - \theta_l) + V_k V_l B_{kl}^{ser} \sin(\theta_k - \theta_l) \quad (2.7)$$

$$Q_{kl} = (B_{kl}^{ser} - B_{kl}^{par}) V_k^2 - V_k V_l G_{kl}^{ser} \sin(\theta_k - \theta_l) - V_k V_l B_{kl}^{ser} \cos(\theta_k - \theta_l) \quad (2.8)$$

b.2 - Injeções de potência ativa e reativa  $P_k$  e  $Q_k$

O cálculo de injeções é feito a partir do cálculo dos fluxos. Somando-se todos os fluxos que saem de uma barra, tem-se o valor da injeção na barra;

$$P_k = \sum_{l \in \Omega_k} P_{kl} \quad k = 1, \dots, N \quad (2.9)$$

$$Q_k = \sum_{l \in \Omega} Q_{kl} \quad k = 1, \dots, N \quad (2.20)$$

$N$  = número de barras.

b.3 - Tensões  $V_k$

As tensões nas barras são medidas diretamente.

2.2.6 - Detecção de medidas com erros grosseiros [6]

A medida após passar pela etapa de pré-filtragem que foi comentada no item 2.2.2., é possível ainda que ela contenha erros grosseiros de magnitude menor que  $30\sigma$ . Portanto, o estimador deve ser projetado de maneira a detectar estas medidas.



O método mais utilizado em trabalhos que se destinam à detecção de medidas com erros grosseiros é baseado no índice de desempenho  $J(\hat{x})$ .

Supondo-se os erros de medidas normais e não correlatos, a matriz  $W$  é diagonal, e o índice  $J(x)$  é dado por:

$$J(\underline{x}) = \sum_{i=1}^m \left[ \frac{z_i - h_i(\underline{x})}{\sigma_i} \right]^2 \quad (2.11)$$

onde  $\sigma_i^2$  é o elemento  $i$  da diagonal de  $W$ . Mesmo que os erros fossem correlatos, ainda assim se poderia obter a equação (2.11), transformando-se a matriz  $W$  numa matriz diagonal.

Como é mostrado por A. Garcia em [6], sob certas condições o índice  $J(\hat{x})$  calculado no ponto  $\underline{x} = \hat{x}$  tem, aproximadamente, distribuição  $\chi^2$  com  $m - n$  graus de liberdade. As condições são:

- i)  $\hat{x} \approx \underline{x}_v$
- ii)  $\underline{w}$  é normalmente distribuído e não existem erros grosseiros nas medidas.

Portanto, após calculado  $\hat{x}$  no processo iterativo, calcula-se o índice  $J(\hat{x})$  e faz-se um teste de hipótese, onde  $\hat{x}$  é o valor estimado.

$J(\hat{x}) \geq \lambda$  rejeita-se a hipótese

$J(\hat{x}) < \lambda$  aceita-se a hipótese

onde  $\lambda$  é um parâmetro calculado com base na distribuição  $\chi^2$  com

$m - n$  graus de liberdade.

onde  $G_{\ell} = m - n$  é o número de graus de liberdade.

Não existindo erros grosseiros, considera-se os dados do estimador como aceitáveis e confiáveis. Caso a hipótese não seja considerada válida, deve-se identificar quais as medidas que contêm erros grosseiros e modificá-las, ou eliminá-las, e novamente estimar o estado.

### 2.2.7 - Identificação de Medidas com Erros Grosseiros [6]

Tendo sido feita a detecção de erros grosseiros e constatada a sua existência, torna-se necessário identificá-los. A identificação é feita através da comparação dos resíduos normalizados.

O resíduo de estimação é definido como a diferença do valor medido e o valor calculado com o estado estimado, ou seja:

$$\underline{r} = \underline{z}^m - \underline{h}(\hat{\underline{x}}) \quad (2.12)$$

A normalização é realizada dividindo-se cada resíduo  $r_i$  pelo seu correspondente desvio padrão  $\sqrt{\rho_{ii}}$ , sendo  $\rho_{ii}$  o elemento  $i$  da diagonal principal da matriz  $R$ , covariância de  $\underline{r}$ . Portanto, necessita-se calcular a matriz  $R$ . Para tanto, define-se o erro de estimação  $\Delta \underline{x}$  como

$$\Delta \underline{x} = \underline{x}_v - \hat{\underline{x}} \quad (2.13)$$

A matriz covariância do vetor erro de estimação é da

da por [6]

$$\text{cov}[\Delta x] = [H^t \cdot W^{-1} \cdot H]^{-1} \quad (2.14)$$

com H calculada no ponto  $\hat{x}$ .

Com adequada análise linearizada no ponto  $\hat{x}$ , obtêm-se a matriz R dos resíduos de estimação [6]

$$R = W - H \text{cov}[\Delta x] \cdot H^t \quad (2.15)$$

substituindo-se (2.14) em (2.15) tem-se

$$R = W - H \cdot [H^t \cdot W^{-1} \cdot H]^{-1} \cdot H^t \quad (2.16)$$

Com a suposição já feita anteriormente em 2.2.4 , tem-se a matriz W diagonal dada por

$$W = \text{diag}[\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_m^2] \quad (2.17)$$

Uma vez obtida a diagonal de R, os resíduos  $r_i$ , são normalizados, ou seja, divididos pelo seu desvio padrão. Assim , o resíduo normalizado  $\tau_i$  é dado por

$$\tau_i = \frac{r_i}{\sqrt{\rho_{ii}}} \quad (2.18)$$

Estes resíduos  $\tau_i$  têm variância unitária e média que depende da localização do erro grosseiro [8]. O maior destes

resíduos indica a medida na qual houve erros grosseiros. Localizada a medida errada, esta é eliminada ou modificada, e o estado é novamente estimado, até que não se detecte mais erros grosseiros nas medidas.

## C A P Í T U L O    I I I

## PRÉ-FILTRAGEM [9] , [11]

3.1 - Introdução

O pré-processamento das medidas que antecede a estimação estática de estado deve ser rápido de maneira a não onerar os cálculos de computação e deve ser capaz de apontar os erros mais grosseiros. O método convencional de pré-processamento, baseado em verificações de limites e experiência, apesar de ser rápido, é indicado para erros mais evidentes, acima de  $30\sigma$ . Mesmo assim pode não detectá-los, onerando assim o algoritmo de estimação. A pré-filtragem deve ser suficientemente eficaz, de maneira a detectar e identificar a maioria dos erros acima de  $30\sigma$ , bem como também erros dentro da faixa de  $3\sigma$  a  $30\sigma$ . Isto em muito aliviará o trabalho das rotinas subsequentes de detecção e identificação, que devem ser executadas tantas vezes quantas forem os erros grosseiros, necessitando assim de maior esforço e tempo computacional.

3.2 - Esquema Geral

Considere o problema de estimar um vetor de estado  $\underline{z}$  (tensões complexas nas barras) através das medidas  $\underline{y}$ , usando-se o modelo de medição:

$$\underline{y} = A\underline{z} + \underline{v} \quad (3.1)$$

onde  $A$  é uma matriz qualquer conhecida,  $\underline{y}$  são erros de medida, e  $\underline{z}$  pode ser estimado como foi descrito em 2.2.4, sendo que antes  $\underline{y}$  deve ser pré-filtrado. O problema agora consiste em determinar quais as medidas de  $\underline{y}$  que possuem erros grosseiros, a fim de que não se obtenha um valor estimado de  $\underline{z}$  não aceitável.

Supõem-se:

1. existir um vetor  $\underline{x}$ , que é relacionado com as medidas  $\underline{y}$ , a través da equação linear:

$$\underline{y} = H\underline{x} + \underline{w} \quad (3.2)$$

onde  $H$  é uma matriz qualquer conhecida, e  $\underline{w}$  são erros de modelagem.

2. O vetor  $\underline{x}$  satisfaz uma relação linear conhecida dada por:

$$C\underline{x} = \underline{0} \quad (3.3)$$

onde  $C$  é uma matriz conhecida.

A estimativa de  $\underline{x}$ , dada pelo mínimo quadrado ponderado, é obtida usando-se (3.2), dada por

$$\hat{\underline{x}} = H^+ \underline{y} \quad (3.4)$$

onde  $\hat{\underline{x}}$  é o vetor estimado e  $H^+$  é a pseudo-inversa de  $H$ , dada por

$$H^+ = (H^t W^{-1} H)^{-1} H^t W^{-1} \quad (3.5)$$

onde  $W^{-1}$  é a inversa da matriz covariância dos erros de medição que, quando é considerada unitária, transforma a expressão (3.5) em:

$$H^+ = (H^t H)^{-1} H^t \quad (3.6)$$

onde a condição de existência da pseudo-inversa é que  $(H^t W^{-1} H)$  ou  $(H^t H)$  seja inversível. Esta condição equivale a condição de observabilidade do estimador.

As medidas com erros grosseiros são detectados e identificadas analisando-se o vetor

$$C\hat{x} = CH^+ y \quad (3.7)$$

Se um dos elementos de (3.7) não for teoricamente igual a zero, pode-se dizer que existem medidas erradas a ser identificadas.

Caso não se tenha um modelo linear do tipo (3.1), e sim um modelo do tipo:

$$y = h(z) + v \quad (3.8)$$

supõem-se que exista um vetor  $x$  que se relacione com as medidas  $y$ , através de:

$$\bar{y} = Hx + \eta \quad (3.9)$$

onde  $\eta$  pode ser  $[h(z) - Hx] + v$ , como também erros devido a aproximações feitas em (3.8) para torná-la linear.

Deve-se ter  $[h(z) - Hx] < \epsilon$ ,  $\epsilon$  é um resíduo, que deve ser mínimo para que  $\eta$  não venha a ser maior que o erro grosseiro da medi

da, e caso sejam feitas aproximações, estas devem ser tais que  $n$  seja também menor que o erro grosseiro da medida. O algoritmo que será baseado no esquema geral visto sempre vai apontar erros nas medidas  $\underline{y}$ , que são maiores que os cometidos na linearização de (3.8).

A idéia geral exposta será aplicada para pré-filtragem de medidas com erros grosseiros em sistemas de potência.

### 3.3. Modelagem das Medidas

#### 3.3.1 - As medidas e os estados.

As medidas  $\underline{y}$  são assumidas como sendo as injeções e fluxo de potência ativa e reativa, que são dadas por:

$$\underline{y} = \begin{bmatrix} \underline{y}_\theta^t & \underline{y}_v^t \end{bmatrix}^t \quad (3.10)$$

onde  $\underline{y}_\theta$  é um vetor que contém medidas de fluxo de potência ativa  $P_{k\ell}$  e medidas de injeções de potência ativa  $P_k$ , e  $\underline{y}_v$  contém medidas de fluxo de potência reativa  $Q_{k\ell}$  e injeções de potência reativa  $Q_k$ .

A modelagem das medidas despreza o acoplamento P- $\theta$  e Q-V.

$$\underline{y}_\theta = \left[ P_{12}, \dots, P_{k\ell}, P_1, \dots, P_k, \dots \right]^t \quad (3.11)$$



$$\underline{y}_v = [Q_{12}, \dots, Q_{kl}, \dots, Q_1, \dots, Q_k, \dots]^t \quad (3.12)$$

Define-se o vetor de estado  $\underline{x}$  como:

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} \underline{x}_\theta^t \\ \underline{x}_v^t \end{bmatrix}^t \quad (3.13)$$

onde  $\underline{x}_\theta$  é o vetor que contém as diferenças de ângulos de tensão entre barras conectadas, e  $\underline{x}_v$  é o vetor que contém as diferenças de magnitudes de tensões entre barras conectadas.

$$\underline{x}_\theta = [\theta_1 - \theta_2, \dots, \theta_k - \theta_l, \dots]^t \quad (3.14)$$

$$\underline{x}_v = [V_1 - V_2, \dots, V_k - V_l, \dots]^t \quad (3.15)$$

onde  $\theta_i$  é o ângulo de tensão na barra  $i$ , e  $V_i$  é a magnitude de tensão na barra  $i$ .

Os vetores  $\underline{x}_\theta$  e  $\underline{x}_v$  devem satisfazer a um conjunto de equações derivadas da topologia da rede, dadas pelas expressões [11]

$$C_\theta \underline{x}_\theta = \underline{0} \quad (3.16)$$

$$C_v \underline{x}_v = \underline{0} \quad (3.17)$$

onde  $C_\theta = C_v$  são matrizes que dependem da topologia da rede, com elementos 1, -1, e 0, e são iguais a matriz de laços fundamentais transposta, A matriz de laços fundamentais é dada por:

$C_{ij} = 0$ , se o laço  $i$  não contém o ramo  $j$ ,

$C_{ij} = 1$ , se o laço  $i$  contém o ramo  $j$  e ambos estão no mesmo sentido e

$C_{ij} = -1$ , se o laço  $i$  contém o ramo  $j$  e ambos estão em sentido contrário.

### 3.3.2 - As equações das medidas.

As equações de medidas serão consideradas em separado para as potências ativas e reativas, tendo em vista a aplicação do desacoplamento entre P- $\theta$  e Q-V.

a. Considerações sobre as equações (2.7) e (2.9), equações de potências ativas:

a1. Os estados são considerados como sendo as diferenças de ângulos de tensão entre barras.

a2. as magnitudes das tensões são consideradas unitárias.

a3. as resistências de linhas são consideradas nulas.

As equações (2.7) e (2.9) transformam-se em:

$$P_{kl} = \sum_{kl} B_{kl} \text{sen}(\theta_k - \theta_l) + \bar{P}_{kl} \quad (3.18)$$

$$P_k = \sum_{kl} B_{kl} \text{sen}(\theta_k - \theta_l) + \Sigma \bar{P}_{kl} \quad (3.19)$$

onde  $\bar{P}_{kl}$  é  $\Sigma \bar{P}_{kl}$  são erros devido às considerações feitas. Pode-se

ainda considerar que  $\text{sen}(\theta_k - \theta_l) \approx (\theta_k - \theta_l)$ , com o que (3.18) e (3.19) passam a ser:

$$P_{kl} = B_{kl}^{\text{ser}} (\theta_k - \theta_l) + \bar{P}_{kl} \quad (3.20)$$

$$P_k = \sum B_{kl}^{\text{ser}} (\theta_k - \theta_l) + \sum \bar{P}_{kl} \quad (3.21)$$

Na forma matricial (3.19) e (3.20) tornam-se

$$\underline{y}_\theta = H_\theta \underline{x}_\theta + \underline{\varepsilon}_\theta \quad (3.22)$$

onde  $H_\theta$  nesse caso, é uma matriz constituída de elementos  $B_{kl}^{\text{ser}}$ ,  $\underline{x}_\theta$  é o vetor que contém os estados  $(\theta_k - \theta_l)$  e  $\underline{\varepsilon}_\theta$  é o erro devido a modelagem.

A matriz  $H_\theta$  pode ser representada por:

$$H_\theta = \begin{bmatrix} H_{\theta 1} \\ \dots \\ H_{\theta 2} \end{bmatrix}$$

onde  $H_{\theta 1}$  é uma matriz diagonal formada através da expressão (3.20) e  $H_{\theta 2}$  é uma matriz formada através da expressão (3.21).

b. Considerações sobre (2.8) e (2.10), equações de potência reativa.

b1. Os estados são considerados como sendo as diferenças das magnitudes entre barras conectadas.

b2. As diferenças angulares são consideradas nulas.

b3. As resistências de linhas são consideradas nulas.

As equações (2.8) e (2.10) passam a ter a seguinte forma:

$$Q_{kl} = -B_{kl}^{ser} V_k^2 + B_{kl}^{ser} V_k (V_k - V_l) + \bar{Q}_{kl} \quad (3.23)$$

$$Q_k = -\Sigma (-B_{kl}^{par} V_k^2 + B_{kl}^{ser} V_k (V_k - V_l)) + \Sigma \bar{Q}_{kl} \quad (3.24)$$

onde  $\bar{Q}_{kl}$  e  $\Sigma \bar{Q}_{kl}$  são erros de modelamento e  $x_v = V_k - V_l$ . Considere-se ainda  $V_k$  como sendo unitária e  $B_k^{par} = 0$ , podendo-se obter as equações (3.23) e (3.24) numa forma mais conveniente.

$$Q_{kl} = B_k^{ser} (V_k - V_l) = B_{kl}^{ser} x_v + \bar{Q}_{kl} \quad (3.25)$$

$$Q_k = \Sigma B_k^{ser} x_v + \Sigma \bar{Q}_{kl} \quad (3.26)$$

Na forma matricial tem-se:

$$\underline{y}_v = H_v \underline{x}_v + \underline{\epsilon}_v \quad (3.27)$$

onde  $H_v$  então é uma matriz constituída de elementos  $B_{kl}^{ser}$ ,  $\underline{x}_v$  é o vetor que contém os estados  $(V_k - V_l)$  e  $\underline{\epsilon}_v$  é o erro devido a modelagem.

A matriz  $H_v$  pode ser apresentada por:

$$H_v = \begin{bmatrix} H_{v1} \\ \dots \\ H_{v2} \end{bmatrix}$$

onde  $H_{v1}$  é uma matriz diagonal formada através da expressão (3.25) e  $H_{v2}$  é uma matriz formada através da expressão (3.26).

### 3.4 - O Algoritmo de Pré-Filtragem

Estima-se  $\underline{x}_\theta$  e  $\underline{x}_v$  de (3.22), que são equivalentes a (3.2), usando-se o critério dos mínimos quadrados ponderados, através de

$$\hat{\underline{x}}_\theta = H_\theta^+ \underline{y}_\theta \quad (3.28)$$

e

$$\hat{\underline{x}}_v = H_v^+ \underline{y}_v \quad (3.29)$$

Sabe-se que os estados  $\underline{x}_\theta$  assim como  $\underline{x}_v$  estão relacionados com a matriz de laços fundamentais do grafo da rede por:

$$C_\theta \underline{x}_\theta = \underline{0} \quad (3.30)$$

$$C_v \underline{x}_v = \underline{0} \quad (3.31)$$

onde  $C_\theta = C_v = C^t$  que é a matriz de laço fundamental transposta.

As relações (3.30) e (3.31), são usadas para detecção e identificação das medidas com erros grosseiros.

Devido a existência de erros inevitáveis provenientes como precisão nos instrumentos do sistema de telemensuras e erros na modelagem, ainda que não existam erros grosseiros.

$$C_{\theta} \underline{x}_{\theta}(t-1) = \underline{\lambda}_{b\theta} \quad (3.32)$$

$$C_{v} \underline{x}_{v}(t-1) = \underline{\lambda}_{bv} \quad (3.33)$$

onde os elementos dos vetores constantes  $\underline{\lambda}_{b\theta}$  e  $\underline{\lambda}_{bv}$  são devidos aos erros mencionados acima e  $\underline{x}_{\theta}(t-1)$  como  $\underline{x}_{v}(t-1)$  são vetores dos estados do sistema sem erros grosseiros nas mensuras, obtidos no instante anterior a  $t$  no qual os estados são  $\underline{x}_{\theta}(t)$  e  $\underline{x}_{v}(t)$

$$\text{se } \|C_{\theta} \underline{x}_{\theta}(t) - \underline{\lambda}_{b\theta}\| < \epsilon \quad (3.34)$$

$$\text{e } \|C_{v} \underline{x}_{v}(t) - \underline{\lambda}_{bv}\| < \epsilon \quad (3.35)$$

$$\text{ou } \|\underline{\lambda}_{\theta} - \underline{\lambda}_{b\theta}\| < \epsilon \quad (3.36)$$

$$\text{e } \|\underline{\lambda}_{v} - \underline{\lambda}_{bv}\| < \epsilon \quad (3.37)$$

pode-se garantir que não existem erros grosseiros nas mensuras, sendo  $\epsilon$  uma precisão desejada.

Para melhor visualização, na detecção pode-se usar as expressões

$$\frac{\|\underline{\lambda}_{\theta}\|}{\|\underline{\lambda}_{b\theta}\|} = 1,0 \quad (3.38)$$

$$\frac{\|\underline{\lambda}_v\|}{\|\underline{\lambda}_{bv}\|} = 1,0 \quad (3.39)$$

no lugar das expressões (3.38) e (3.39), tendo-se em vista que se não existirem erros grosseiros as relações (3.40) e (3.41) devem ser satisfeitas a menos de um desvio, onde a relação for violada pode-se garantir a existência de medida ou medidas com erros.

O cálculo de computação de (3.28) e (3.29) é reduzido considerando-se apenas as medidas de fluxos de potência. Neste caso a matriz H passa a ser diagonal e as expressões (3.28) e (3.29) passam a ter a seguinte forma:

$$\hat{\underline{x}}_{\theta} = H_{\theta 1}^{-1} \underline{y}_{\theta} \quad (3.40)$$

$$\hat{\underline{x}}_v = H_{v1}^{-1} \underline{y}_v \quad (3.41)$$

As medidas de injeções de potência ativa e reativa são pré-filtradas verificando-se o somatório dos fluxos de potência que saem de cada barra, que deve ser igual a injeção de potência naquela barra.

Tendo sido detectado a presença de erros grosseiros num determinado laço, faz-se a interseção deste laço com todos os outros laços que não apresentarem erros grosseiros, e as medidas que não pertencerem a esta interseção são identificados como possíveis portadoras, de erro grosseiro.

Muitas vezes não se pode identificar somente uma medida, mas sempre é possível se identificar um grupo de medidas, onde a que possui erro grosseiro esteja também incluída.

É importante notar que este método é independente de parâmetros da rede e de medições, sendo somente função da topologia da rede. Este fato conduz a resultados bastante confiáveis apesar de aproximados.



## CAPÍTULO IV

### DESEMPENHO DO ALGORITMO DE PRÉ-FILTRAGEM

#### 4.1 - Introdução

Neste capítulo serão apresentados dois sistemas como casos testes. Um sistema A, de 5 barras e 7 linhas [10] e um sistema B de 26 barras e 32 linhas [12].

Para uma dada condição de carga e geração, obteve-se os resultados do fluxo de carga. Tomou-se as injeções e fluxos de potência ativa e reativa como sendo as medidas e a elas adicionou-se erros para simular as medidas erradas. Os erros grosseiros são simulados arbitrariamente. A matriz covariância da incerteza nas medidas,  $\omega$ , é considerada igual a matriz identidade.

Fez-se uma comparação entre os valores de  $\underline{x}_0$  e  $\underline{x}_v$ , calculados através do fluxo de potência e pelo método proposto, para se comprovar a validade das aproximações feitas no algoritmo proposto.

#### 4.2 - Simulação do Sistema A [10]

Para melhor visualização e esclarecimento do algoritmo, é feito para o sistema A um estudo mais detalhado.

Na figura 4-1 é mostrado o diagrama do sistema A.

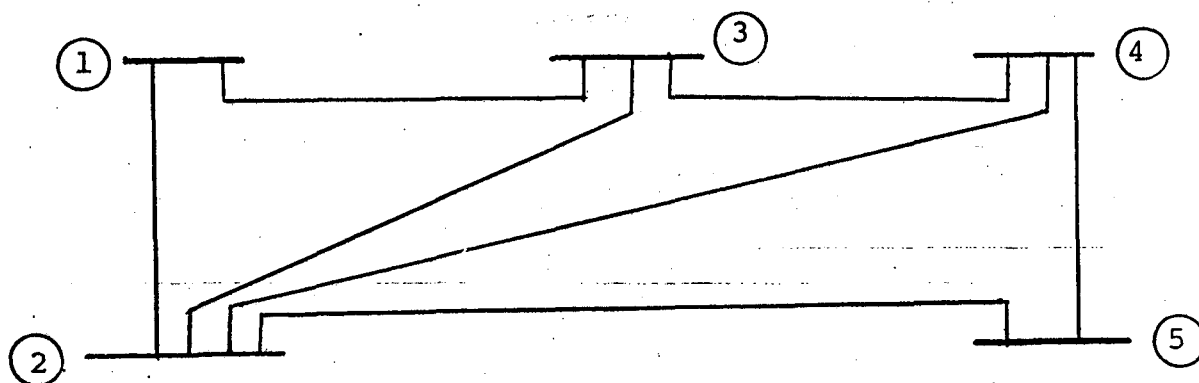


Fig. 4-1 - Diagrama Unifilar do Sistema A.

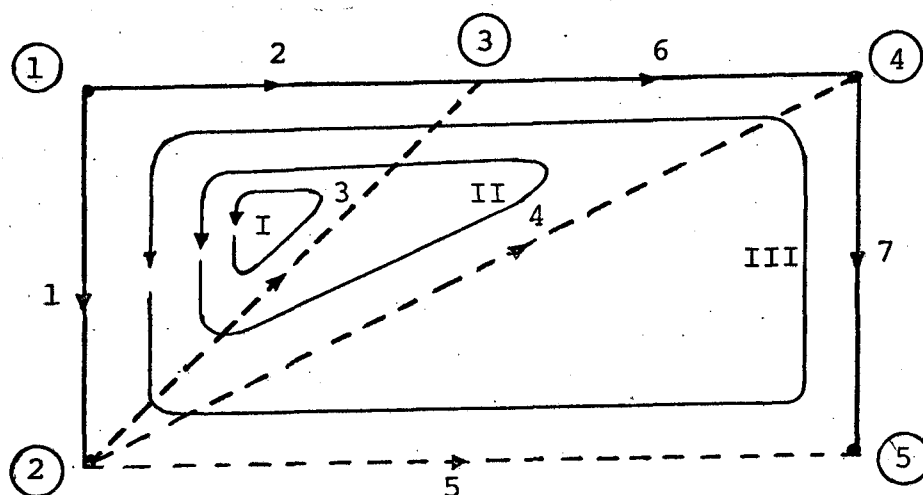


Fig. 4-2 - Grafo orientado do Sistema A.

IN = vetor contendo n<sup>o</sup> iniciais dos ramos e ligações

JT = vetor contendo n<sup>o</sup> terminais dos ramos e ligações

$$IN = [1, 1, 2, 2, 2, 3, 4]^t$$

$$JT = [2, 3, 3, 4, 5, 4, 5]^t$$

Considera-se a árvore formada pelos ramos 1-2, 1-3, 3-4, 4-5

A co-árvore será então formada por

2-3, 2-4, 2-5

Tendo em vista a árvore considerada, ter-se-á se seguinte matriz incidência dos laços fundamentais

$$C = \begin{matrix} & & \text{I} & \text{II} & \text{III} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{matrix} & \left[ \begin{array}{ccc} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 \end{array} \right] \end{matrix}$$

portanto,

$$C^t = C_\theta = C_v = \begin{matrix} & & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ \begin{matrix} \text{I} \\ \text{II} \\ \text{III} \end{matrix} & \left[ \begin{array}{ccccccc} 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \end{array} \right] \end{matrix}$$

Linha k-l	$R_{kl}^{ser}$	$x_{kl}^{ser}$	$B_{kl}^{par}$
1-2	0,02	0,06	0,030
1-3	0,08	0,24	0,025
2-3	0,06	0,18	0,020
2-4	0,06	0,18	0,020
2-5	0,04	0,12	0,015
3-4	0,01	0,03	0,010
4-5	0,08	0,24	0,025

Tabela 4-1 - Dados de linhas do sistema A

A tabela 4-2 fornece os dados de geração e carga para o estudo de fluxo de potência do Sistema A.

Barra	TENSÃO		GERAÇÃO		CARGA	
	Volts	Fase (graus)	Ativo (Megawatts)	Reativo (Megavars)	Ativo (Megawatts)	Reativo (Megavars)
1	1,06	0,0	0	0	0	0
2	1,0	0,0	40	30	20	10
3	1,0	0,0	0	0	45	15
4	1,0	0,0	0	0	40	5
5	1,0	0,0	0	0	60	10

Tabela 4-2 - Dados de geração e carga do Sistema A para o estudo de fluxo de potência.

Para a programação de carga e geração da tabela 4-2, foi calculado o fluxo de carga com dados da tabela 4-1 e obtida a tabela 4-3, onde tem-se os valores da tensão e ângulo de tensão resultantes.

Barra	tensão (pu)	ângulo (graus)	ângulo (rad)
1	1,06	0,0	0,0
2	1,0474	-2,8064	-0,0490
3	1,0242	-4,9970	-0,0872
4	1,0236	-5,3292	-0,0930
5	1,0179	-6,1503	-0,1073

Tabela 4-3 - Valores das magnitudes da tensão e ângulos para o Sistema A.

A tabela 4-4 fornece valores de fluxos de potência nas linhas com os estados da tabela 4-3.

LINHA	DA BARRA	PARA BARRA	FLUXO DE POTÊNCIA (p u)	
			ATIVO	REATIVO
1	1	2	0,8887	-0,0858
2	1	3	0,4072	0,0116
3	2	3	0,2469	0,0355
4	2	4	0,2794	0,0296
5	2	5	0,5482	0,0734
6	3	4	0,1887	-0,0520
7	4	5	0,0633	-0,0228

Tabela 4-4 - Dados de fluxos de potência nas linhas para o Sistema A.

A tabela 4-5 fornece as potências nas barras resultantes para o mesmo caso em estudo.

BARRA	POTÊNCIA ATIVA(pu)	POTÊNCIA REATIVA(pu)
1	1,2959	-0,0742
2	0,2000	0,2000
3	-0,4500	-0,1500
4	-0,400	-0,0500
5	-0,600	-0,1000

Tabela 4-5 - Valores das potências ativa e reativa nas barras do Sistema A.

Toma-se  $B_{kl}^{ser} = H_{kl}$  e usando-se as expressões (3.20) e (3.21) no sistema A, tem-se na forma matricial.

$$\begin{bmatrix} P_{12} \\ P_{13} \\ P_{23} \\ P_{24} \\ P_{25} \\ P_{34} \\ P_{45} \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_{25} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{45} & 0 \\ -H_{12} & -H_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_{12} & 0 & -H_{23} & -H_{24} & -H_{25} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H_{13} & H_{23} & 0 & 0 & -H_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_{24} & 0 & H_{34} & -H_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_{25} & 0 & H_{45} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \theta_1 - \theta_2 \\ \theta_1 - \theta_3 \\ \theta_2 - \theta_3 \\ \theta_2 - \theta_4 \\ \theta_2 - \theta_5 \\ \theta_3 - \theta_4 \\ \theta_4 - \theta_5 \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

Usar-se-á somente a parte de fluxos de potência ativa para estimar  $\hat{\underline{x}}_{\theta}$ , que será dada por:

$$\hat{\underline{x}}_{\theta} = H_{\theta 1}^{-1} \underline{y}_{\theta} \quad (4.2)$$

onde  $\underline{y}_{\theta} = [P_{12} \dots P_{ij} \dots]^t$

A detecção das medidas de injeções de potência ativa é feita através da somatória dos fluxos de potência ativa que saem de cada barra, que deve ser igual a injeção de potência ativa na barra. Se essa igualdade prevalecer pode-se excluir alguma medida que tenha sido selecionada como portadora de erro grosseiro.

Toma-se  $B_{kl}^{ser} = H_{kl}$  e usando-se as expressões (3.25) e (3.26) no sistema A, tem-se na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} Q_{12} \\ Q_{13} \\ Q_{23} \\ Q_{24} \\ Q_{25} \\ Q_{34} \\ Q_{45} \\ Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_{25} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{45} \\ -H_{12} & -H_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_{12} & 0 & -H_{23} & -H_{24} & -H_{25} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H_{13} & H_{23} & 0 & 0 & -H_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_{24} & 0 & H_{34} & -H_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_{25} & 0 & 0 & H_{45} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x} = \begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_2 - V_3 \\ V_2 - V_4 \\ V_2 - V_5 \\ V_3 - V_4 \\ V_4 - V_3 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Usar-se-ã somente a parte de medidas contendo fluxos de potência reativa para estimar  $\underline{x}_v$ , que ficará dado por:

$$\underline{\hat{x}}_v = H_{v1}^{-1} \underline{y}_v \quad (4.4)$$

onde  $\underline{y}_v = [Q_{12} \dots Q_{kl} \dots]^t$

Como pode-se observar,  $H_\theta = H_v$ ,  $H_\theta^+ = H_v^+$  deve ser recalculada somente quando houver mudança na topologia da rede.

4.2.1 - Pré-filtragem das medidas contendo fluxo de potência ativa e injeções de potência ativa, para o sistema A.

Na tabela 4-6 são mostrados os valores de  $\underline{x}_\theta$  obtidos pela estimação através de (4-2), usando-se como medidas todos os fluxos de potência ativa que vão da barra k para barra l. Também são mostrados os valores de  $\underline{x}_\theta$  obtidos do resultado do fluxo de carga, a fim de se mostrar que as aproximações feitas nas equações foram válidas e o modelo é satisfatório.

Linha	Da Barra	Para Barra	$\underline{x}_\theta$			
			Fluxo Carga		Estimado	
			Graus	Radianos	Graus	Radianos
1	1	2	2,8075	0,0490	3,0539	0,0533
2	1	3	4,9962	0,0872	5,5978	0,0977
3	2	3	2,1887	0,0382	2,5439	0,0444
4	2	4	2,5210	0,0440	2,8820	0,0503
5	2	5	3,3403	0,0583	3,7701	0,0658
6	3	4	0,3323	0,0058	0,3266	0,0057
7	4	5	0,8193	0,0143	0,8709	0,0152

Tabela 4-6 - Valores de  $\underline{x}_\theta$  obtidos pelo fluxo de potência e por estimação.

Usando-se os valores de  $\underline{x}_\theta$  dados pelo fluxo de carga na expressão (3.16) tem-se a igualdade satisfeita, e para os valores de  $\underline{x}_\theta$  estimado, o produto não é exatamente zero devido as aproximações feitas para a linearização do modelo. Estes últimos valores são tomados como sendo os elementos do vetor  $\underline{\lambda}_{b\theta}$ , como se pode ver na tabela 4-7.

LAÇO	G R A U S		R A D I A N O S	
	Fluxo Potência $C_\theta \underline{x}_\theta$	Estimado $C_\theta \underline{x}_\theta = \lambda_{b\theta}$	Fluxo Potência $C_\theta \underline{x}_\theta$	Estimado $C_\theta \underline{x}_\theta = \lambda_{b\theta}$
I	0,0	0,0055	0,0	0,000096
II	0,0	0,0115	0,0	0,000200
III	0,0	0,0287	0,0	0,000500

Tabela 4-7 - Valores de  $\lambda_{b\theta}$  para  $\underline{x}_\theta$  da tabela 4-6.



Observação: Os medidores de fluxo de potência nas linhas possuem a mesma numeração das linhas no sistema da fig. 4-2 {1,2, ... 7} e os medidores de potência injetada nas barras correspondem aos medidores {8,9, ...12}

a) Simulação com um erro grosseiro

1º Teste: Erro de 100% na medida 3 de fluxo de potência ativa.

Na tabela 4-8 mostra-se os valores estimados, com erro de 100% na medida 3.

Linha	Da Barra k	Para Barra l	Valor estimado	
			$\underline{x}_\theta$ graus	$\underline{x}_\theta$
1	1	2	3,0539	0,0533
2	1	3	5,5978	0,0977
3	2	3	5,0926	0,0889
4	2	4	2,8820	0,0503
5	2	5	3,7701	0,0658
6	3	4	0,3266	0,0057
7	4	5	0,8709	0,0152

Tabela 4-8 - Valores de  $\underline{x}_\theta$  referentes ao teste 1.

Na tabela 4-9 tem-se os valores de  $C_\theta \underline{x}_\theta$  para valores de  $\underline{x}_\theta$  estimados, dados na tabela 4-8.

LAÇO	$C_\theta \underline{x}_\theta = \lambda_\theta$	
	Graus	Radianos
I	2,5487	0,0445
II	0,0115	0,002
III	0,0287	0,0005

Tabela 4-9 - Valores de  $\lambda_\theta$  referentes ao teste 1.

Na tabela 4-10 tem-se a relação entre  $\lambda_{\theta}/\lambda_{b\theta}$

LAÇO	DETECTOR DE ERROS	
	$\lambda_{\theta}/\lambda_{b\theta}$	$\lambda_{\theta}/\lambda_{b\theta}$
	Graus	Radianos
I	463,40	463,45
II	1,0	1,0
III	1,0	1,0

Tabela 4-10 - Valores de  $\lambda_{\theta}/\lambda_{b\theta}$  para o teste 1.

Observando-se a tabela 4-10, pode-se verificar que a relação  $\lambda_{\theta}/\lambda_{b\theta}$  é diferente da unidade no laço I. Isto é devido a presença, no laço, de uma medida com erro grosseiro.

A tabela 4-11 mostra quais as medidas que fazem parte dos laços.

Medida \ Laço	1	2	3	4	5	6	7
I	1	1	1	0	0	0	0
II	1	1	0	1	0	1	0
III	1	1	0	0	1	1	1

Tabela 4-11 - Localização das medidas nos laços.

Na tabela 4-11 tem-se que

1, existe a medida

0, não existe a medida.

Faz-se a interseção do laço I que contém medida erra

da com os laços restantes, e as medidas que não pertencem a interseção são as que podem ter o erro grosseiro. Observando-se a tabela 4-10 conclui-se que a medida 3 é a medida errada.

As medidas de injeção de potência ativa satisfizeram o valor calculado pelo somatório dos fluxos de potência ativa, exceto das injeções que continham em seu somatório a medida 3 de fluxo de potência ativa, que foi identificada como portadora de erro grosseiro.

2º Teste: Erro de 50% na medida 3 de fluxo de potência ativa.

Na tabela 4-12 mostra-se valores estimados de  $\underline{x}_\theta$  quando tem-se erro de 50% na medida 3.

Linha	Da Barra k	Para Barra l	Valor estimado	
			$\underline{x}_\theta$ grau	$\underline{x}_\theta$ rad.
1	1	2	3,0539	0,0533
2	1	3	5,598	0,0977
3	2	3	3,81948	0,06666
4	2	3	2,8820	0,0503
5	2	5	3,7701	0,0658
6	3	4	0,3266	0,0057
7	4	5	0,8709	0,0152

Tabela 4-12 - Valores de  $\underline{x}_\theta$  referentes ao teste 2.

Na tabela 4-13 tem-se os valores de  $C_\theta \underline{x}_\theta$  calculados com valores de  $\underline{x}_\theta$ , dados na tabela 4-12.

LAÇO	$C_\theta \underline{x}_\theta = \lambda_\theta$	
	Graus	Radianos
I	1,27538	0,0226
II	0,0115	0,0002
III	0,0287	0,0005

Tabela 4-13 - Valores de  $\lambda_\theta$  referentes ao teste 2.

Usando-se o mesmo raciocínio feito anteriormente, concluiu-se que a medida errada é a medida 3.

Na tabela 4-14 tem-se os valores de  $\lambda_{\theta}/\lambda_{b\theta}$ .

LAÇO	DETECTOR DE ERROS	
	$\lambda_{\theta}/\lambda_{b\theta}$	
	Grau	Radianos
I	231,89	231,50
II	1,0	1,0
III	1,0	1,0

Tabela 4-14 - Valores de  $\lambda_{\theta}/\lambda_{b\theta}$  referentes ao teste 2.

4.2.2 - Pré-filtragem de medidas contendo fluxo de potência reativa e injeções de potência reativa.

Na tabela 4-15 tem-se os valores de  $\underline{x}_v$  dados pelo fluxo de carga, e os valores de  $\underline{x}_v$  estimados usando-se apenas as medidas de fluxo de potência reativa, sem se considerar erros grosseiros.

Linha	Da Barra	Para Barra	$\underline{x}_v$ Fluxo Carga	$\underline{x}_v$ Estimado
1	1	2	0,01260	-0,0051480
2	1	3	0,03580	0,00278
3	2	3	0,02320	0,00639
4	2	4	0,02380	0,00533
5	2	5	0,02950	0,00881
6	3	4	0,00060	-0,00156
7	4	5	0,00570	-0,00547

Tabela 4-15 - Valores de  $\underline{x}_v$  obtidos pelo fluxo de carga e por estimação.

Nota-se que o valor estimado difere do valor calculado pelo fluxo de carga porém, para a finalidade do algoritmo, não terá influência, tendo-se em vista que os valores estimados serão usados, na expressão (3.35), para calcular-se os valores de  $\lambda_{bv}$ , que são mostrados na tabela 4-16.

Laço	$C_{v-v} x_v = \lambda_{bv}$
I	0,001538
II	0,000022
III	0,007912

Tabela 4-18 - Valores de  $\lambda_{bv}$  para o teste 2.

No pré-filtro, a condição para que um dado seja considerado como aceitável, é que ele esteja satisfazendo a equação (3.41) para valores de  $\lambda_{bv}$  dados na tabela 4-16.

a - Simulação com um erro grosseiro

1º Teste: Erro 100% na medida 3, de fluxo de potência reativa.

Na tabela 4-17 tem-se os valores estimados para simulação com um erro grosseiro de 100% na medida 3.

Linha	Da Barra	Para Barra	$x_v$
1	1	2	-0,0051480
2	1	3	0,00278
3	2	3	0,01278
4	2	4	0,00533
5	2	5	0,00881
6	3	4	-0,00156
7	4	5	-0,00547

Tabela 4-17 - Valores de  $x_v$  obtidos por estimação.

Com os valores da tabela 4-17 calcula-se a tabela 4-18, através da expressão (3.33) e obtém-se.

Laço	$\lambda_v$
I	0,004852
II	0,000022
III	0,007912

Tabela 4-18 - Valores de  $\lambda_v$ .

Na tabela 4-19 mostra-se a relação entre  $\lambda_v$  e  $\lambda_{bv}$ .

Laço	$\lambda_v/\lambda_{bv}$
I	3,15474
II	1,0
III	1,0

Tabela 4-19 - Valores de  $\lambda_v/\lambda_{bv}$ .

Através da tabela 4-19 verifica-se a presença de dados errados nas medidas que pertencem ao laço I, pois a relação entre lambdas é significativamente diferente.

Pela tabela 4-11, verifica-se que as medidas pertencentes ao laço I são as medidas 1, 2 e 3. Nos laços II e III não foi detectado erro, e as medidas 2 e 3 pertencem a este laço, conclui-se que a medida errada é a medida 3.

b - Simulação com dois erros grosseiros.

1º Teste: Erro de 100% na medida 3 e na medida 4 de fluxo de potência reativa.

Na tabela 4-20 tem-se os valores estimados para simulação com 2 erros grosseiros. (100% medidas 3 e 4).

Linha	Da Barra	Para Barra	$\underline{x}_v$
1	1	2	-0,0051480
2	1	3	0,02780
3	2	3	0,01278
4	2	4	0,01066
5	2	5	0,00881
6	3	4	-0,00156
7	4	5	-0,0547

Tabela 4-20 - Valores de  $\underline{x}_v$  obtidos por estimação

Na tabela 4-21 tem-se os valores de  $\lambda_v$ .

Laço	$\lambda_v$
I	0,004852
II	0,02072
III	0,007912

Tabela 4-21 - Valores de  $\lambda_v$ .

Na tabela 4-21a tem-se a relação  $\lambda_v/\lambda_{bv}$ .

Laço	$\lambda_v/\lambda_{bv}$
I	3,15474
II	941,82
III	1,0

Tabela 4-21a - Valores de  $\lambda_v/\lambda_{bv}$

Como pode-se observar, nos laços II e III, existem dados com erros grosseiros.

Usando-se a tabela 4-11, pode-se verificar que as

medidas erradas são a 3 e a 4.

#### 4.3 - Simulação do sistema B [12]

Na figura 4-3 é mostrado o diagrama do sistema B.

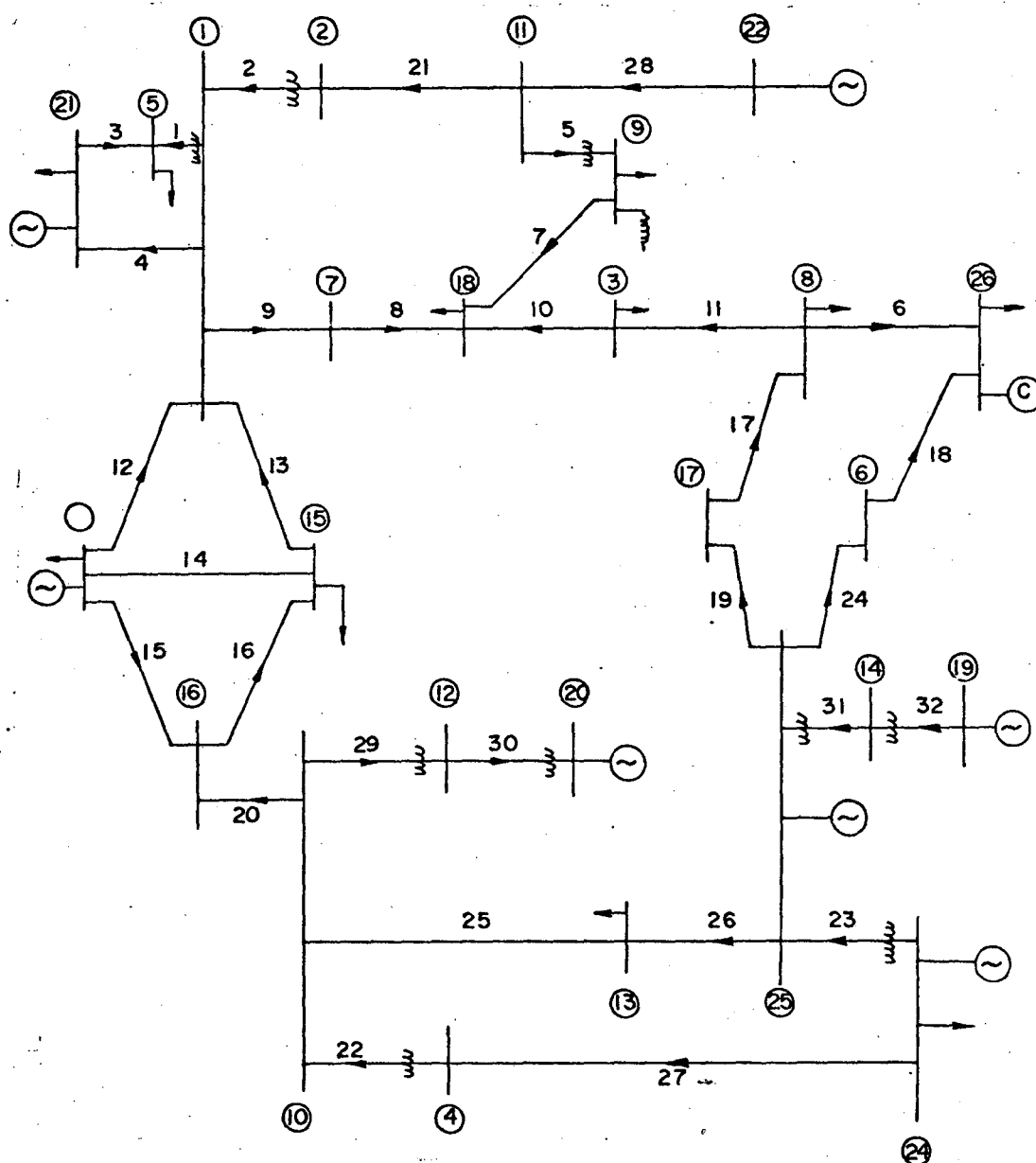


Fig. 4-3 - Diagrama unifilar do Sistema B.



Na figura 4-4 é mostrado o grafo do sistema B e os laços fundamentais para a rede considerada.

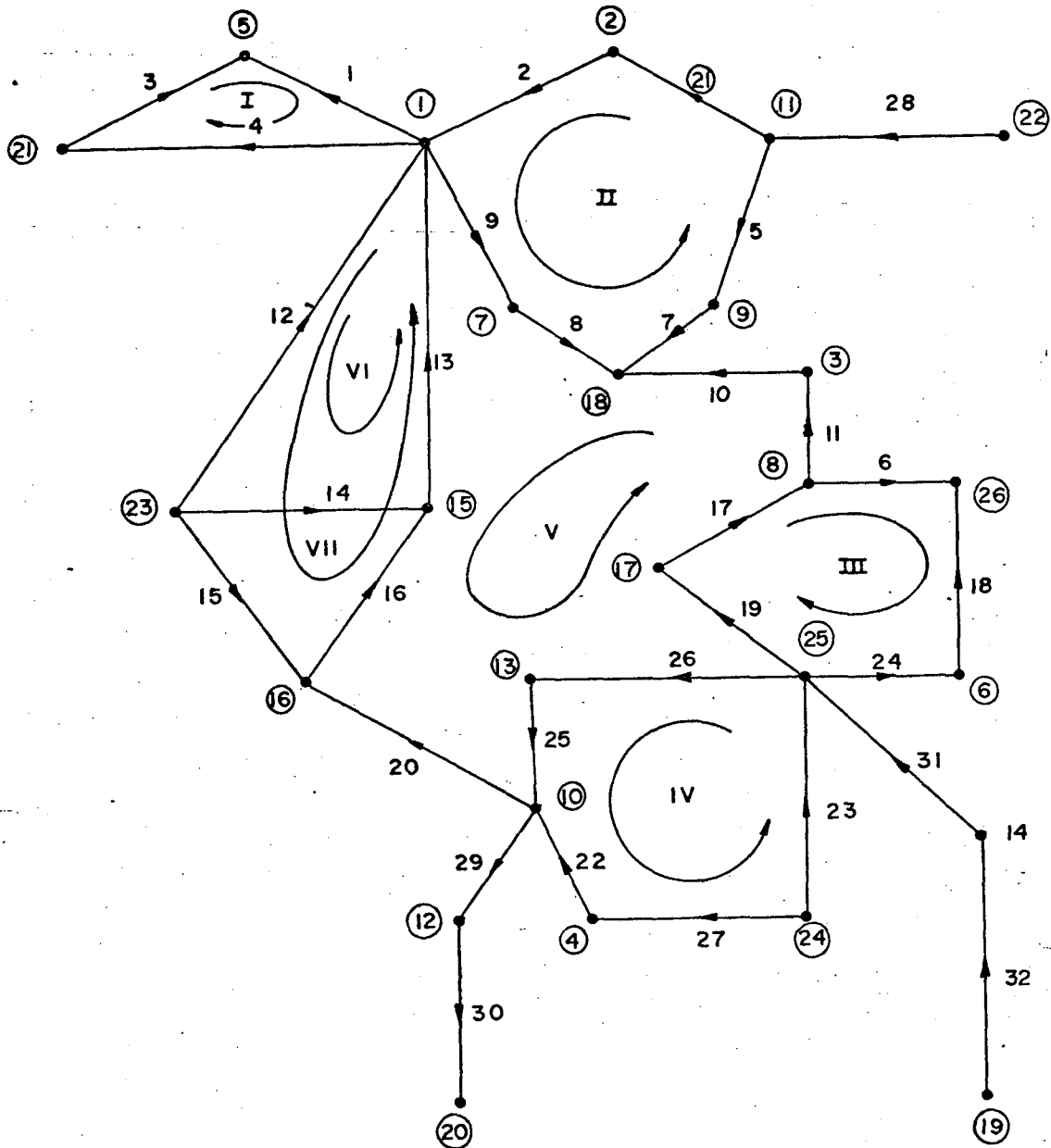


Fig. 4-4 - Laços Fundamentais para o Sistema B.

Os medidores de fluxo de potência nas linhas possuem a mesma numeração das linhas no sistema da fig.4-4 {1,2,..26}, e os medidores de potência injetada nas barras correspondem respectivamente aos medidores {33, 34,... 58}.

Tendo-se em vista os laços fundamentais considerados tem-se a matriz de laços fundamentais.

	I	II	III	IV	V	VI	VII
1	-1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	0
5	0	-1	0	0	0	0	0
6	0	0	1	0	0	0	0
7	0	-1	0	0	0	0	0
8	0	1	0	0	-1	0	0
9	0	1	0	0	-1	0	0
10	0	0	0	0	1	0	0
11	0	0	0	0	1	0	0
12	0	0	0	0	0	-1	-1
13	0	0	0	0	-1	1	1
14	0	0	0	0	0	1	0
15	0	0	0	0	0	0	1
C = 16	0	0	0	0	-1	0	1
17	0	0	1	0	1	0	0
18	0	0	-1	0	0	0	0
19	0	0	1	0	1	0	0
20	0	0	0	0	-1	0	0
21	0	1	0	0	0	0	0
22	0	0	0	-1	0	0	0
23	0	0	0	1	0	0	0
24	0	0	-1	0	0	0	0
25	0	0	0	1	-1	0	0
26	0	0	0	1	-1	0	0
27	0	0	0	-1	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0

Como foi visto em 3.3.1  $C_{\theta} = C_{\nu} = C^t$ .

A tabela 4-22 fornece os dados de linha e transformadores do sistema.

Linha	Da Barra	Para Barra	Resistência p.u.	Reatância p.u.	Susceptância p.u.	tap.
1	1	5	0,	0,0392	0,	0,960
2	2	1	0,	0,0131	0,	1,0250
3	21	5	0,	0,4320	0,	
4	1	21	0,	0,3140	0,	
5	11	9	0,	0,0150	0,	1,0250
6	8	26	0,0513	0,2118	0,0496	
7	9	18	0,1494	0,3392	0,8240	
8	7	18	0,0658	0,1494	0,0364	
9	1	7	0,0533	0,1210	0,0294	
10	3	18	0,0618	0,2397	0,0638	
11	8	3	0,0676	0,2620	0,0698	
12	23	1	0,0610	0,2521	0,0590	
13	15	1	0,0513	0,1986	0,0530	
14	23	15	0,0129	0,0532	0,0148	
15	23	16	0,0906	0,3742	0,0874	
16	16	15	0,0921	0,3569	0,0950	
17	17	8	0,0865	0,3355	0,0984	
18	6	26	0,0281	0,1869	0,0474	
19	25	17	0,0735	0,2847	0,0758	
20	10	16	0,0199	0,0785	0,0808	
21	11	2	0,0086	0,0707	0,6034	
22	4	10	0,	0,0147	0,	0,8850
23	24	25	0,	0,0305	0,	0,975
24	25	6	0,0459	0,3055	0,0774	
25	13	10	0,0619	0,2401	0,0638	
26	25	13	0,0610	0,2365	0,0630	
27	24	4	0,0107	0,0617	0,8942	
28	22	11	0,0074	0,0608	0,5186	
29	10	12	0,	0,0392	0,	0,9750
30	12	20	0,	0,1450	0,	0,9750
31	14	25	0,	0,1750	0,	0,9900
32	19	14	0,	0,1540	0,	1,025

Tabela 4-22 - Dados de linhas referente ao Sistema B.

A tabela 4-23 fornece os resultados de barramentos para uma determinada programação de geração e carga:

Barra	T E N S Ã O		GERAÇÃO (pu)		CARGA (pu)	
	Volts (pu)	fase (grau)	Ativo	Reativo	Ativo	Reativo
1	1,000	-20,469	0,85983	0,65533	0,71400	0,20200
2	1,027	-19,583	0,	0,	0,	0,
3	0,976	-27,315	0,	0,	0,	0,
4	0,912	-14,787	0,	0,	0,	0,
5	1,027	-23,115	0,	0,	1,30700	0,29200
6	0,992	-20,055	0,	0,	0,03400	0,01200
7	0,964	-24,979	0,	0,	0,43100	0,12400
8	0,966	-27,235	0,	0,	0,42600	0,13600
9	1,013	-16,294	0,	0,	1,0200	0,26900
10	1,014	-16,53	0,	0,	0,81500	0,20600
11	1,013	-14,991	0,	0,	0,	0,
12	1,020	-17,841	0,	0,	0,56800	0,1700
13	0,969	-15,287	0,	0,	0,47700	0,20600
14	0,971	-5,881	0,	0,	0,4340	0,1050
15	0,993	-17,014	0,	0,	0,3970	0,1000
16	0,983	-19,729	0,	0,	0,1140	0,2680
17	0,963	-18,824	0,	0,	0,2320	0,0610
18	0,969	-27,150	0,	0,	9,6670	0,2110
19	1,000	0,0	0,6500	0,0698	0,0200	0,0060
20	1,000	-18,246	-0,5000	-0,0826	0,5510	0,2370
21	1,000	-21,971	0,5000	0,06319	0,5360	0,1240
22	1,000	-5,235	2,8000	-0,8672	0,	0,
23	1,000	-14,491	1,8000	-0,2596	0,3550	-0,0570
24	1,000	-6,914	2,8000	1,3519	0,	-0,2540
25	1,000	-7,886	1,1000	-0,7824	0,	0,
26	1,000	-27,014	0,	0,3885	0,5640	0,1170

Tabela 4-23 - Dados de carga e geração para o Sistema B.

\* Na barra 9 existe um capacitor fornecendo 30,801 MVAR.

Para a programação de carga e geração da tabela 4-23 foram determinados os fluxos de potência nas linhas que são apresentados na tabela 4-24.

Barra	Da Barra	Para Barra	FLUXO DE POTÊNCIA (pu)	
			Ativo	Reativo
1	1	5	1,2595	0,4202
2	2	1	1,1829	0,1822
3	21	5	0,0475	-0,0619
4	1	21	0,0835	0,0011
5	11	9	1,5448	-0,4693
6	8	26	-0,0517	-0,1639
7	9	18	0,5247	-0,4690
8	7	18	0,1897	-0,1239
9	1	7	0,6428	0,0219
10	3	18	-0,0036	-0,0005
11	8	3	-0,0036	-0,066
12	23	1	0,3952	-0,1036
13	15	1	0,2761	-0,1236
14	23	15	0,8104	-0,0532
15	23	16	0,2394	-0,0458
16	16	15	-0,1272	-0,0368
17	17	8	0,3852	-0,1211
18	6	26	0,6285	-0,1207
19	25	17	0,6481	-0,0134
20	10	16	0,7649	-0,1803
21	11	2	1,1945	-0,3620
22	4	10	2,1612	1,1640
23	24	25	0,5706	0,8671
24	25	6	0,6840	-0,0426
25	13	10	0,0401	-0,2187
26	25	13	0,5346	-0,0061
27	24	4	2,2294	0,7389
28	22	11	2,8000	-0,8672
29	10	12	0,6190	0,5288
30	12	20	0,0510	0,3347
31	14	25	0,1960	-0,1061
32	19	14	0,6300	0,0638

Tabela 4-24 - Dados de fluxos de potência nas linhas para o Sistema B.

#### 4.3.1 - Pré-filtragem considerando-se medidas de Potência ativa

a - Simulação sem erro grosseiro

Na tabela 4-25 são mostradas as diferenças angulares  $x_{\theta}^1(t-1)$

usando como medidas todos os fluxos de potência ativa da tabela 4-24 e todas as potências ativas injetadas nos barramentos da tabela 4-23. São mostrados também, as diferenças angulares  $\underline{x}_{\theta}(t-1)^2$  que é estimado usando-se somente as medidas de fluxo de potência ativa da tabela 4-24, assim como o valor das diferenças angulares  $(\theta_k - \theta_l)$  obtido do resultado do fluxo de potência, a fim de mostrar que a aproximação no modelo de rede é razoável. Nesta simulação os medidores não apresentam grosseiros.

Linha	Da Barra i	Para Barra j	Estado Estimado (Graus)		Fluxo de carga $\theta_k - \theta_l$
			$\underline{x}_{\theta}(t-1)^1$	$\underline{x}_{\theta}(t-1)^2$	
1	1	5	2,729	2,830	2,645
2	2	1	0,914	0,888	0,886
3	21	5	1,175	1,175	1,144
4	1	21	1,605	1,501	1,502
5	11	9	1,369	1,329	1,303
6	8	26	-0,656	-0,630	-0,221
7	9	18	12,118	10,199	10,856
8	7	18	1,897	1,621	2,171
9	1	7	5,268	4,458	4,510
10	3	18	-0,203	-0,051	-0,165
11	8	3	-0,018	-0,051	0,080
12	23	1	6,010	5,107	5,978
13	15	1	3,344	3,139	3,455
14	23	15	2,609	2,469	2,523
15	23	16	5,353	5,134	5,238
16	16	15	-2,736	-2,601	-2,715
17	17	8	8,002	7,403	8,411
18	6	26	6,912	6,732	6,959
19	25	17	11,211	10,571	10,938
20	10	16	3,667	3,438	3,199
21	11	2	4,958	4,841	4,592
22	4	10	1,625	1,822	1,743
23	24	25	0,977	0,997	0,972
24	25	6	12,255	11,975	12,169
25	13	10	0,600	0,550	1,243
26	25	13	7,710	7,242	7,401
27	24	4	8,081	7,883	7,873
28	22	11	9,900	9,751	9,756
29	10	12	1,373	1,392	1,311
30	12	20	0,435	0,424	0,405
31	14	25	1,879	1,965	2,005
32	19	14	5,687	5,557	5,881

Tabela 4-25 - Valores de diferenças angulares estimados e determinados pelo fluxo de carga:

A tabela 4-26 mostra o produto  $C_{\theta} x_{\theta}^1(t-1)$ , onde  $x_{\theta}^1(t-1)$  é o vetor de estado mostrado na tabela 4-25. Como não foram considerados qualquer tipo de erros nas medições, este produto deveria ser igual a zero se não houvessem erros de modelagem. Em outras palavras, a soma das diferenças angulares em um laço fechado deveria ser igual a zero. Os laços independentes estão numerados de acordo com a figura 4-4.

DETECTOR DE ERROS	
Laço	$C_{\theta} x_{\theta}^1(t-1)$ (graus)
I	0,05166
II	-0,37453
III	-0,59711
IV	-0,41471
V	-0,82070
VI	-0,04830
VII	-0,04697

Tabela 4-26 - Valores de  $\lambda_{b\theta}$

b) Simulação com um erro grosseiro

No caso da presença de um erro grosseiro, fez-se várias simulações e sempre foi possível se fazer a detecção e identificação.

1ª Teste: Erro Grosseiro de 40% no medida de fluxo de potência ativa na linha 1.

Usou-se as medidas de fluxos de potência ativa e injeções de potência ativa e estimou-se o valor de  $\hat{x}_\theta(t)$  através da expressão (3.28).

A tabela 4-27 mostra os valores de  $C_{\theta} \hat{x}_\theta(t) = \lambda_\theta$ ,  $C_{\theta} \hat{x}_\theta(t-1) = \lambda_{b\theta}$ , assim como a diferença  $\lambda_\theta - \lambda_{b\theta}$  e a razão  $\lambda_\theta / \lambda_{b\theta}$

Laço	$\lambda_\theta$	$\lambda_{b\theta}$	$\lambda_\theta - \lambda_{b\theta}$	$\lambda_\theta / \lambda_{b\theta}$
I	-5,32762	-0,05166	-5,37928	103,13
II	-0,77925	-0,37453	-0,40472	2,08
III	-0,59269	-0,59711	0,00442	0,99
IV	-0,37842	-0,41471	0,03629	0,91
V	-1,00604	-0,82070	-0,18534	1,22
VI	-0,15470	-0,04830	-0,1064	3,20
VII	-0,16286	-0,04697	0,11589	3,46

Tabela 4-27 - Valores de  $\lambda_\theta$ ,  $\lambda_{b\theta}$ ,  $\lambda_\theta - \lambda_{b\theta}$  e  $\lambda_\theta / \lambda_{b\theta}$  referentes ao teste 1.

Convém observar que a relação  $\lambda_\theta / \lambda_{b\theta}$  não satisfaz exatamente a expressão (3.40). Isto deve-se ao uso da pseudo inversa. Mesmo assim pode-se notar a presença de medida com erro grosseiro no laço I, o que é confirmado pela diferença  $\lambda_\theta - \lambda_{b\theta}$ .

Através da tabela 4-28 pode-se fazer a identificação da medida de fluxo de potência ativa ou do grupo de medidas que possui erro grosseiro.



Medida Laço	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
I	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
II	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
III	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
IV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0
V	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 4-28 - Localização das medidas nos laços para o Sistema B.

Fazendo-se a interseção do laço I com os demais laços que não apresentaram erros grosseiros, tem-se como medidas prováveis de possuírem erros grosseiros, aquelas pertencentes ao seguinte conjunto:

$$\{P_{15}, P_{215}, P_{121}\}$$

As injeções  $P_k$  são obtidas através da somatória das medidas de fluxo, por

$$P_1 \neq P_{15} - P_{21} + P_{121} + P_{17} - P_{231} - P_{151}$$

$$P_2 = P_{21} - P_{112}$$

$$P_3 = P_{318} - P_{83}$$

$$P_4 = P_{410} - P_{244}$$

$$P_5 \neq -P_{15} - P_{215}$$

$$P_6 = P_{626} - P_{256}$$

$$P_7 = P_{718} - P_{17}$$

$$P_8 = P_{826} + P_{83} - P_{178}$$

$$P_9 = -P_{119} + P_{918}$$

$$P_{10} = P_{1016} - P_{410} - P_{1310} + P_{1012}$$

$$P_{11} = P_{119} + P_{112} - P_{2211}$$

$$P_{12} = -P_{1012} + P_{1220}$$

$$P_{13} = -P_{1310} - P_{2513}$$

$$P_{14} = P_{1425} - P_{1914}$$

$$P_{15} = P_{151} - P_{2315} - P_{1615}$$

$$P_{16} = -P_{2316} + P_{1615}$$

$$P_{17} = -P_{17\ 8} - P_{25\ 17}$$

$$P_{18} = -P_{9\ 18} - P_{7\ 18} - P_{3\ 18}$$

$$P_{19} = -P_{19\ 14}$$

$$P_{20} = -P_{12\ 20}$$

$$P_{21} = -P_{21\ 5} - P_{1\ 21}$$

$$P_{22} = P_{22\ 11}$$

$$P_{23} = P_{23\ 1} + P_{23\ 15}$$

$$P_{24} = P_{24\ 25} + P_{24\ 4}$$

$$P_{25} = P_{25\ 17} + P_{25\ 6} + P_{25\ 13} - P_{14\ 25}$$

$$P_{26} = -P_{8\ 26} - P_{6\ 26}$$

O novo conjunto de medidas de fluxo de potência ativa com possibilidade de erro grosseiros será:

$$\{P_{1\ 5}\}$$

pois  $P_{21\ 5}$  e  $P_{1\ 21}$  que foram selecionados no conjunto de medidas com possibilidade de terem erros grosseiros, satisfazem o somatório. As medidas de injeção de potência ativa com possibilidade de erros grosseiros serão:

$$\{P_1, P_5\}$$

pois não satisfazem ao somatório. Portanto, o conjunto de medidas com possibilidade de erros grosseiros será:

$$\{P_{1\ 5}, P_1, P_5\}$$

Observação:

O vetor de medida foi formado de tal forma que os primeiros 32 elementos são medidas de fluxo de potência ativa e os 26 restantes são injeções de potência ativa.

2º Teste: Erro Grosseiro de 40% na medida de injeção de potência ativa da barra 1.

Foram usadas as medidas de fluxos de potência ativa e injeções de potência ativa e estimou-se o valor de  $\hat{x}_\theta(t)$  através de (3.28).

A tabela 4-29 mostra os valores de  $\lambda_\theta, \lambda_{b\theta}$  assim como a diferença  $\lambda_\theta - \lambda_{b\theta}$  e a razão  $\lambda_\theta/\lambda_{b\theta}$ .

LAÇO	$\lambda_\theta$	$\lambda_{b\theta}$	$\lambda_\theta - \lambda_{b\theta}$	$\lambda_\theta/\lambda_{b\theta}$
I	0,15578	0,05166	0,10412	3,02
II	-0,28081	-0,37453	0,09372	0,75
III	-0,59814	-0,59711	-0,00103	1,00
IV	-0,42311	-0,41471	-0,0084	1,02
V	-0,77779	-0,82070	0,04291	0,95
VI	-0,02367	-0,04830	0,02463	0,49
VII	-0,02013	-0,04697	0,02684	0,43

Tabela 4-29 - Valores de  $\lambda_\theta, \lambda_{b\theta}, \lambda_\theta - \lambda_{b\theta}$  e  $\lambda_\theta/\lambda_{b\theta}$  referentes ao 2º teste.

A tabela 4-29 mostra a presença de erros grosseiros. Através da tabela 4-28, seleciona-se o seguinte conjunto de medidas de fluxos de potência como prováveis portadoras de erro grosseiro.

$$\{P_{15}, P_{215}, P_{121}\}$$

Através do somatório dos fluxos de potência ativa verifica-se as medidas de injeções de potência ativa.

$$P_1 \neq P_{15} - P_{21} + P_{121} + P_{17} - P_{231} - P_{151}$$

$$P_2 = P_{21} - P_{112}$$

$$P_3 = P_{318} - P_{83}$$

$$P_4 = P_{410} - P_{244}$$

$$P_5 = -P_{25} - P_{215}$$

$$P_6 = P_{626} - P_{256}$$

$$P_7 = P_{718} - P_{17}$$

$$P_8 = P_{826} + P_{83} - P_{178}$$

$$P_9 = -P_{119} + P_{918}$$

$$P_{10} = P_{1016} - P_{410} - P_{1310} + P_{1012}$$

$$P_{11} = P_{119} + P_{112} - P_{2211}$$

$$P_{12} = -P_{1012} + P_{1220}$$

$$P_{13} = P_{1310} - P_{2513}$$

$$P_{14} = P_{1425} - P_{1914}$$

$$P_{15} = P_{151} - P_{2315} - P_{1615}$$

$$P_{16} = -P_{2316} + P_{1615}$$

$$P_{17} = P_{178} - P_{2517}$$

$$P_{18} = -P_{918} - P_{718} - P_{318}$$

$$P_{19} = + P_{19 \ 14}$$

$$P_{20} = - P_{12 \ 20}$$

$$P_{21} = P_{21 \ 5} - P_{1 \ 21}$$

$$P_{22} = P_{22 \ 11}$$

$$P_{23} = P_{23 \ 1} + P_{23 \ 15} + P_{23 \ 16}$$

$$P_{24} = P_{24 \ 25} + P_{24 \ 4}$$

$$P_{25} = P_{25 \ 17} + P_{25 \ 6} + P_{25 \ 13} - P_{14 \ 25}$$

$$P_{26} = - P_{8 \ 26} - P_{6 \ 26}$$

O conjunto de medidas de fluxo de potência ativa com possibilidade possuem erros grosseiros passa a ser

$$\{\phi\}$$

O conjunto de medidas de injeção de potência ativa é formado por

$$\{P_1\}$$

Portanto, só é identificada uma medida com erro grosseiro, que é a medida de injeção de potência ativa na barra 1.

3º Teste: Erro grosseiro de 40% na medida de fluxo de potência ativa na linha 1.

Usou-se, aqui, somente as medidas de fluxo de potência ativa nas linhas e estimou-se o valor de  $\hat{x}_{\theta}(t)$  através de (4.5).

Na tabela 4-30 mostra-se os valores de  $\lambda_\theta/\lambda_{b\theta}$ , assim como os das diferenças  $\lambda_\theta - \lambda_{b\theta}$  e os das razões  $\lambda_\theta/\lambda_{b\theta}$ .

LAÇO	$\lambda_\theta$	$\lambda_{b\theta}$	$\lambda_\theta - \lambda_{b\theta}$	$\lambda_\theta/\lambda_{b\theta}$
I	-1,2847	-0,1547	-1,1300	8,3045
II	0,2808	0,2808	0,0	1,0
III	-1,3637	-1,3637	0,0	1,0
IV	-0,9168	-0,9168	0,0	1,0
V	0,0229	0,0229	0,0	1,0
VI	0,5025	0,5025	0,0	1,0
VII	0,5656	0,5656	0,0	1,0

Tabela 4-30 - Valores de  $\lambda_\theta$ ,  $\lambda_{b\theta}$ ,  $\lambda_\theta - \lambda_{b\theta}$  e  $\lambda_\theta/\lambda_{b\theta}$  referentes ao 3º teste.

Convém notar que agora é usada a expressão (3.42) para estimação de  $\hat{x}_{\theta(t)}$ , e a relação (3.40) é plenamente satisfeita, pois não se tem a influência do efeito do espalhamento dos erros grosseiros sobre outras medidas que não possuem erros grosseiros. Da mesma maneira que no teste 1, chega-se a um conjunto de medidores com possibilidades de erros grosseiros dado por:

$$\{P_{15}, P_1, P_5\}$$

#### Conclusões:

- 1 - Os testes realizados indicam que o modelo visado para pré-filtro e que trabalha com variáveis de ramo é eficiente
- 2 - Nos testes realizados, o método proposto neste trabalho quase sempre identifica o medidor com erro grosseiro e na pior situação ele seleciona um conjunto de medi-

das com erro grosseiro que possui poucos elementos, comparado com o número total de medidas:

c) Simulação com dois erros grosseiros

Para o caso da presença de mais erros grosseiros usou-se somente as medidas de fluxo de potência ativa.

A tabela 4-31 mostra o conjunto de medidores selecionados pelo algoritmo proposto para várias simulações com erro grosseiro de 40% em cada uma das medições diárias.

Medidas com erro grosseiro	Medidas com possibilidade de erro grosseiro
{ 1, 2 }	{ 1, 2, 33, 34, 37 }
{ 2, 3 }	{ 1, 2, 3, 4, 33, 34, 37, 53 }
{ 3, 4 }	{ 1, 3, 4, 33, 37, 53 }
{ 4, 5 }	{ 4, 5, 33, 41, 53 }
{ 5, 6 }	{ 5, 6, 40, 41, 43, 58 }
{ 6, 7 }	{ 6, 7, 40, 41, 50, 58 }
{ 7, 8 }	{ 7, 8, 39, 41, 50 }
{ 8, 9 }	{ 8, 9, 33, 39, 50 }
{ 9, 10 }	{ 8, 9, 10, 33, 35, 39, 50 }
{ 10, 11 }	{ 10, 11, 35, 40, 50 }
{ 11, 12 }	{ 11, 12, 33, 35, 40, 55 }
{ 12, 13 }	{ 12, 13, 14, 33, 47, 55 }
{ 13, 14 }	{ 12, 13, 14, 33, 47, 55 }
{ 14, 15 }	{ 14, 15, 47, 48, 55 }
{ 15, 16 }	{ 15, 16, 47, 48, 55 }
{ 16, 17 }	{ 16, 17, 40, 47, 48, 49 }
{ 17, 18 }	{ 17, 18, 38, 40, 49, 58 }
{ 18, 19 }	{ 18, 19, 38, 49, 57, 58 }
{ 19, 20 }	{ 19, 20, 42, 48, 49, 57 }
{ 20, 21 }	{ 20, 21, 34, 42, 43, 48 }
{ 21, 22 }	{ 21, 22, 34, 36, 42, 43 }
{ 22, 23 }	{ 22, 23, 27, 36, 42, 56, 57 }
{ 23, 24 }	{ 23, 24, 38, 56, 57 }
{ 24, 25 }	{ 24, 25, 26, 38, 42, 45, 57 }
{ 25, 26 }	{ 25, 26, 42, 45, 57 }
{ 26, 27 }	{ 23, 26, 27, 36, 45, 56, 57 }
{ 27, 28 }	{ 27, 36, 43, 54, 56 }
{ 28, 29 }	{ 42, 43, 44, 54 }
{ 30, 31 }	{ 44, 46, 52, 57 }
{ 31, 32 }	{ 46, 51, 57 }
{ 33, 34 }	{ 33, 34 }



continuação da tabela 4-31.

Medidores com erro grosseiro	Medidores com possibilidade de erro grosseiro
{34, 35}	{34, 35}
{36, 37}	{36, 37}
{37, 38}	{37, 38}
{38, 39}	{38, 39}
{39, 40}	{39, 40}
{40, 41}	{40, 41}
{41, 42}	{41, 42}
{42, 43}	{42, 43}
{43, 44}	{43, 44}
{44, 45}	{44, 45}
{45, 46}	{45, 46}
{46, 47}	{46, 47}
{47, 48}	{47, 48}
{48, 49}	{48, 49}
{49, 50}	{49, 50}
{50, 51}	{50, 51}
{51, 52}	{51, 52}
{52, 53}	{52, 53}
{54, 55}	{54, 55}
{55, 56}	{55, 56}
{56, 57}	{56, 57}
{57, 58}	{57, 58}

Tabela 4-31 - Conjunto de medidas com erro grosseiro e com possibilidade do mesmo.

#### 4.3.2 - Pré-filtragem considerando-se medidas de Potência reativa

##### a) Simulação sem erros grosseiros

Na tabela 4.32 é mostrado o estado estimado  $\underline{x}_{v(t-1)}$ , usando-se como medidores os fluxos de potência reativa reativa, e também a diferença de tensão  $(V_k - V_\ell)$  obtida através do fluxo de carga, de modo a permitir a verificação da validade do modelo proposto.

Linha	Da Barra i	Para Barra j	Estado Estimado $x_{v(t-1)} = \lambda_{bv}$	Fluxo de Potência ( $V_k - V_\ell$ )
1	1	5	0,0165	-0,0270
2	2	1	0,0024	0,0270
3	21	5	-0,0267	0,0270
4	1	21	0,0003	0,0
5	11	9	-0,0070	0,0
6	8	26	-0,0347	-0,0340
7	9	18	-0,1591	0,0440
8	7	18	-0,0185	-0,0050
9	1	7	0,0026	0,0360
10	3	18	-0,001	-0,0020
11	8	3	-0,0173	-0,0010
12	23	1	-0,0261	0,0
13	15	1	-0,0245	-0,0070
14	23	15	-0,0028	0,0070
15	23	16	-0,0171	0,0170
16	16	15	-0,0131	-0,0100
17	17	8	-0,0406	-0,0010
18	6	26	-0,0226	-0,0080
19	25	17	0,0039	0,0370
20	10	16	0,0142	0,0310
21	11	2	-0,0256	-0,0140
22	4	10	0,0171	-0,1020
23	24	25	0,0264	0,0
24	25	6	-0,0130	0,0080
25	13	10	-0,0525	-0,0450
26	25	13	-0,0014	0,0310
27	24	4	0,0456	0,0880
28	22	11	-0,0527	-0,0130
29	10	12	0,0207	-0,0060
30	12	20	0,0485	0,0200
31	14	25	-0,0186	-0,0290
32	19	14	0,0098	0,0290

Tabela 4-32 - Valores de  $x_v$  estimados e determinados pelo fluxo de carga.

filtro.

1º Teste: Erro grosseiro de 10% na medida 2; fluxo de potência reativa.

Usou-se para estimação, somente as medidas de fluxo de potência reativa.

A tabela 4-34 mostra os valores de  $C_{v-v}(t) = \lambda_v$ , de  $C_{v-v}(t-1) = \lambda_{bv}$  assim como a diferença  $\lambda_v - \lambda_{bv}$  e a razão  $\lambda_v/\lambda_{bv}$ .

LAÇO	$\lambda_v$	$\lambda_{bv}$	$\lambda_v - \lambda_{bv}$	$\lambda_v/\lambda_{bv}$
I	-0,0429	-0,0429	0,0	1,0
II	0,1273	0,1271	0,0002	1,0015
III	-0,0436	-0,0436	0,0	1,0
IV	-0,0902	-0,0902	0,0	1,0
V	0,0314	0,0314	0,0	1,0
VI	-0,0013	-0,0013	0,0	1,0
VII	-0,0287	-0,0287	0,0	1,0

Tabela 4-34 - Valores de  $\lambda_v$ ,  $\lambda_{bv}$ ,  $\lambda_v - \lambda_{bv}$  e  $\lambda_v/\lambda_{bv}$  para o teste 1.

Observa-se que, embora a diferença  $\lambda_\theta - \lambda_{b\theta}$  seja próximo de zero e a relação  $\lambda_\theta/\lambda_{b\theta}$  quase unitária, mesmo assim pode-se detectar a presença de erros grosseiros no laço II.

Usando-se a tabela 4-28, tem-se que as medidas de fluxo de potência reativa com possibilidade de erro grosseiro são

{Q<sub>2 1</sub>, Q<sub>11 9</sub>, Q<sub>9 18</sub>, Q<sub>11 2</sub>}

A tabela 4.33 mostra o produto  $C_{v-v} x_{v-v}(t-1)$ , como foi visto, e  $x_{v-v}(t-1)$  é o vetor de estado apresentado na tabela 4-32. Como não foram considerados erros nas medições, este produto deveria ser igual a zero desde que não houvessem erros na modelagem. Isto é, a somatória das tensões de ramo, em um laço fechado, deveria ser igual a zero. Os laços independentes estão enumerados de acordo com a figura 4-4.

LAÇO	$C_{v-v} x_{v-v}(t-1) = \lambda_{bv}$
I	-0,0429
II	0,1271
III	-0,0436
IV	-0,0902
V	0,0314
VI	-0,0013
VII	-0,0287

Tabela 4-33 - Valores de  $\lambda_{bv}$

Os valores da tabela 4-33 não são nulos. Atribuindo-se este fato a erros de modelagem. Os valores são assumidos como sendo o limiar  $\lambda_{bv}$ , que serão usados nas expressões (3.39) e (3.41).

b) Simulação com um erro grosseiro

No caso de um erro grosseiro foram feitas várias simulações, e sempre foi possível fazer a detecção e identificação, de um conjunto de medidas que continha a metade errada. Foram feitas simulações com 10%, 40%, 70% e 100% na medida 2 de fluxo de potência reativa de maneira a se observar o funcionamento do pré-

As injeções de potência reativa devem ser iguais ao somatório dos fluxos de potência reativa que saem da barra, só não satisfeitas as igualdades que possuem, em seu somatório, a medida 2 de fluxo de potência reativa que são:

$$Q_1 \neq Q_{15} - Q_{21} + Q_{121} + Q_{17} - Q_{231} - Q_{151}$$

$$Q_2 \neq Q_{21} - Q_{112}$$

Portanto, o conjunto de medidas de fluxo de potência reativa com possibilidade ter erros grosseiros, passa a ser:

$$\{Q_{21}\}$$

pois as demais medidas de fluxo de potência reativa, selecionadas primeiramente, pertencem ao somatório de fluxo de potência reativa que satisfazem a injeção de potência reativa na barra, então podendo serem consideradas como sem erros grosseiros.

O conjunto de medidas de injeção com erro grosseiro é:

$$\{Q_1, Q_2\}$$

Portanto, o conjunto de medidas com erros grosseiros é formado por:

$$\{Q_{21}, Q_1, Q_2\},$$

ou seja, pelas medidas:

$$\{2, 33, 34\}.$$

Deve-se incluir no conjunto de medidas selecionadas, com possibilidade de erros grosseiros, também as medidas de fluxo de potência reativa radiais. Portanto, o conjunto passa a ser:

{2, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34}

2º Teste: Erro grosseiro de 40% na medida 2, fluxo de potência reativa.

Usou-se para estimação de  $\hat{x}_v$ , somente as medidas de fluxo de potência reativa.

A tabela 4-35 mostra os valores de  $C_{v-v}(t) = \lambda_v$ , de  $C_{v-v}(t-1) = \lambda_{bv}$ , assim como a diferença  $\lambda_v - \lambda_{bv}$  e a razão  $\lambda_v/\lambda_{bv}$ .

LAÇO	$\lambda_v$	$\lambda_{bv}$	$\lambda_v - \lambda_{bv}$	$\lambda_v/\lambda_{bv}$
I	-0,0429	-0,0429	0,0	1,0
II	0,1280	0,1271	0,0009	1,0071
III	-0,0436	-0,0436	0,0	1,0
IV	-0,0902	-0,0902	0,0	1,0
V	0,0314	0,0314	0,0	1,0
VI	-0,0013	-0,0013	0,0	1,0
VII	-0,0287	-0,0287	0,0	1,0

Tabela 4-35 - Valores de  $\lambda_v$ ,  $\lambda_{bv}$ ,  $\lambda_v - \lambda_{bv}$  e  $\lambda_v/\lambda_{bv}$  para o 2º teste.

Pode-se, aqui, também detectar a presença de erros grosseiros nas medidas do laço II e fazendo as mesmas considerações do 1º teste, tem-se que o grupo de medidas é o mesmo formado no 2º teste, que é:

3º Teste: Erro de 70% na medida 2 de fluxo de potência reativa.

Usou-se para a estimação de  $\hat{x}_v$ , somente as medidas de fluxo de potência reativa.

A tabela 4-36 mostra os valores de  $C_{v-v}(t) = \lambda_v$ , de  $C_{v-v}(t-1) = \lambda_{bv}$ , assim como a diferença  $\lambda_v - \lambda_{bv}$  e a razão  $\lambda_v / \lambda_{bv}$ .

LAÇO	$\lambda_v$	$\lambda_{bv}$	$\lambda_v - \lambda_{bv}$	$\lambda_v / \lambda_{bv}$
I	-0,0429	-0,0429	0,0	1,0
II	0,1287	0,1271	0,0016	1,012
III	-0,0436	-0,0436	0,0	1,0
IV	-0,0902	-0,0902	0,0	1,0
V	0,0314	0,0314	0,0	1,0
VI	-0,0013	-0,0013	0,0	1,0
VII	-0 0287	-0 0287	0 0	1 0

Tabela 4-36 - Valores  $\lambda_v, \lambda_{bv}, \lambda_v - \lambda_{bv}$  e  $\lambda_v / \lambda_{bv}$  para o 3º teste.

Através da tabela 4-36 detecta-se a presença de erros grosseiros nas medidas do laço II.

O grupo de medidas com possibilidade de apresentarem grosseiros é idêntico ao grupo selecionado no 1º Teste.

4º Teste: Erro de 100% na medida 2 de fluxo de potência reativa.

Usou-se para estimação, somente as medidas de fluxo de potência reativa.

A tabela 4-37 mostra os valores de  $C_{v-v}(t)$ , de  $C_{v-v}(t-1)$  assim como a diferença  $\lambda_v - \lambda_{bv}$  e a razão  $\lambda_v / \lambda_{bv}$ .

LAÇO	$\lambda_v$	$\lambda_{bv}$	$\lambda_v - \lambda_{bv}$	$\lambda_v / \lambda_{bv}$
I	-0,0429	-0,0429	0,0	1,0
II	0,1294	0,1271	0,0023	1,0180
III	-0,0436	-0,0436	0,0	1,0
IV	-0,0902	-0,0902	0,0	1,0
V	0,0314	0,0314	0,0	1,0
VI	-0,0013	-0,0013	0,0	1,0
VII	-0,0287	-0,0287	0,0	1,0

Tabela 4-37 - Valores de  $\lambda_v$ ,  $\lambda_{bv}$ ,  $\lambda_v - \lambda_{bv}$  e  $\lambda_v / \lambda_{bv}$  para o 4º teste.

Pela tabela 4-37 detecta-se a presença de erros grosseiros nas medidas do laço II.

O conjunto de medidas com possibilidade de erros grosseiros é idêntico ao do 1º teste.

5º Teste: Erro grosseiro de 70% na medida 33 de injeção de potência reativa.

Usou-se para estimação de  $\hat{x}_v$ , somente as medidas de fluxo de potência reativa.

A tabela 4-38 mostra os valores de  $C_{v-v}(t) = \lambda_v$ , de  $C_{v-v}(t-1) = \lambda_{bv}$ , assim como a diferença  $\lambda_v - \lambda_{bv}$  e a razão  $\lambda_v / \lambda_{bv}$ .

LAÇO	$\lambda_v$	$\lambda_{bv}$	$\lambda_v - \lambda_{bv}$	$\lambda_v / \lambda_{bv}$
I	-0,0429	-0,0429	0,0	1,0
II	-0,1271	-0,1271	0,0	1,0
III	-0,0436	-0,0436	0,0	1,0
IV	-0,0902	-0,0902	0,0	1,0
V	0,0314	0,0314	0,0	1,0
VI	-0,0013	-0,0013	0,0	1,0
VII	-0,0287	-0,0287	0,0	1,0

Tabela 4-38 - Valores de  $\lambda_v$ ,  $\lambda_{bv}$ ,  $\lambda_v - \lambda_{bv}$  e  $\lambda_v / \lambda_{bv}$  para o 5º teste.



Na tabela 4-38 não é detectada a presença de erros grosseiros nas medidas de fluxo de potência reativa. Portanto, o conjunto de medidas de fluxo de potência reativa com possibilidade de terem erros grosseiros é:

$$\{\phi\}$$

Verifica-se, então, se o somatório das medidas de potência reativa que saem da barra é igual a injeção naquela barra. A igualdade só não é satisfeita para a medida de injeção 33. Portanto, o conjunto de medidas com possibilidade de erro grosseiro é:

$$\{33\}$$

### c) Simulação com dois erros grosseiros

1º Teste: Erros de 60% nas medidas de fluxo de potência reativa 2 e 22.

Usou-se para estimação somente as medidas de fluxos de potência reativa.

A tabela 4-39 mostra os valores de  $C_{v-v}(t) = \lambda_v$ , de  $C_{v-v}(t-1) = \lambda_{bv}$ , assim como os valores de  $\lambda_v - \lambda_{bv}$  e  $\lambda_v / \lambda_{bv}$ .

Através da tabela 4-39 detecta-se presença de erros grosseiros nas medidas de fluxo de potência reativa pertencentes aos laços II e III. O conjunto de medidas com possibilidade de terem erros grosseiros, é obtido observando-se a tabela 4-28, sendo o seguinte:

$$\{2, 5, 7, 21, 22, 23, 25, 26, 27\}$$

LAÇO	$\lambda_v$	$\lambda_{bv}$	$\lambda_v - \lambda_{bv}$	$\lambda_v / \lambda_{bv}$
I	-0,0429	-0,0429	0,0	1,0
II	0,1285	0,1271	0,0014	1,0110
III	-0,0436	-0,0436	0,0	1,0
IV	-0,1005	-0,0902	0,0103	1,1141
V	0,0314	0,0314	0,0	1,0
VI	-0,0013	-0,0013	0,0	1,0
VII	-0,0287	-0,0287	0,0	1,0

Tabela 4-39 - Valores de  $\lambda_v$ ,  $\lambda_{bv}$ ,  $\lambda_v - \lambda_{bv}$  e  $\lambda_v / \lambda_{bv}$  para o 1º teste.

Observando-se a igualdade do somatório dos fluxos de potência reativa com as injeções de potência, verifica-se que as seguintes igualdades não são satisfeitas.

$$Q_1 \neq Q_{15} - Q_{21} + Q_{12} + Q_{17} - Q_{23} - Q_{15}$$

$$Q_2 \neq Q_{21} - Q_{11}$$

$$Q_4 \neq Q_{410} - Q_{24}$$

$$Q_{10} \neq Q_{1016} - Q_{410} - Q_{1310} - Q_{1012}$$

Portanto, o conjunto de medidores de fluxo de potência reativa com possibilidade de terem erros grosseiros passa a ser:

$$\{2, 22\}.$$

O conjunto de medidores de injeção de potência ativa com possibilidade de terem erros grosseiros é:

$$\{33, 34, 36, 42\}.$$

Portanto, o conjunto de medidas com possibilidade de erros grosseiros

ros é:

{2, 22, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 42}

Deve-se mencionar também a importância da pré-filtragem das medidas de magnitude de tensão. Neste trabalho não foram incluídas as medidas de magnitude e tensão no pré-filtro, visto que para pré-processá-las basta que se faça um teste de limites, o qual é de fácil implementação.

Fez-se uso neste trabalho do computador IBM 4341 com sistema operacional DOS 370, pertencente a Universidade Federal de Santa Catarina. A linguagem usada foi FORTRAN IV.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

#### 5.1 - Introdução

Este Capítulo tem o objetivo de colocar em evidência as conclusões tiradas nos capítulos anteriores, e sugerir outras pesquisas de maneira a dar continuidade ao trabalho.

#### 5.2 - Conclusões

O método proposto para pré-filtragem é função da topologia da rede e das observações.

Os cálculos da matriz de laços fundamentais, assim como o da pseudo-inversa ou a inversa da matriz  $H$ , só necessitam ser atualizados quando se muda a topologia da rede.

O algoritmo mostrou bom desempenho para uma faixa ampla de erros grosseiros.

Sempre é possível se identificar nos exemplos estudados uma medida que contenha o erro grosseiro ou um conjunto de medidas o qual contém a medida ou as medidas erradas, exceto as medidas radiais.

As aproximações feitas para obtenção do modelo linearizado mostraram-se válidas.

É conveniente fazer-se a estimação dos estados do

pré-filtro somente com medidas de fluxo de potência. Com isto o pré-filtro torna-se ainda mais rápido, pois elimina-se o cálculo da pseudo-inversa.

Se as medidas com erro grosseiro forem medidas de injeção de potência, o conjunto de medidas selecionadas com possibilidade de erro grosseiro será formado somente por medidas de injeções de potência.

O algoritmo de pré-filtragem não detecta e nem identifica medidas de fluxo de potência quando estas forem radiais.

Para sistemas de potências reais, é necessário o uso de um algoritmo para determinar sistematicamente a matriz de laços fundamentais que é usada no método proposto. Tais algoritmos necessitariam por sua vez, do uso de algoritmos para empreender a busca de uma árvore geradora da rede elétrica.

O algoritmo apresentado se presta a descentralização. Em outras palavras, o sistema elétrico real pode ser dividido em subsistemas. A pré-filtragem pode ser realizada para cada subsistema e posteriormente as medidas podem ser enviadas ao centro de processamento do sistema global.

Devido a dificuldade de pré-filtragem de medidas radiais pelo algoritmo proposto, deve-se aumentar as redundâncias de medidas nos nós, visando facilitar a pré-filtragem das medidas radiais.

### 5.3 - Sugestões para futuras pesquisas

A fim de dar continuidade a este trabalho, são feitas algumas sugestões:

- Estudo de um algoritmo que através do conjunto selecionado na fase de pré-filtragem, escolha a medida ou medidas que realmente possuam erros grosseiros. Este algoritmo poderia ser localizado após a pré-filtragem mas antes da estimação de estado.
- Usar a teoria da álgebra booleana sobre as equações de laço para auxiliar na seleção do conjunto de medidas, a fim de se melhorar o tempo de cálculo e memória do algoritmo do pré-filtro.
- Fazer o acoplamento do algoritmo de pré-filtragem proposto com um algoritmo de estimação de estado, visando-se analisar a contribuição da pré-filtragem na redução do tempo de cálculo para estimar o estado de um sistema.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - HANDSCHIN, E.S. - "Real Time Data Processing Using State Estimation in Electric Power Systems" - In: Real-time Control of Electric Power Systems. Amsterdam, Elsevier Publ. Co., 1972, pp. 29-61.
- [2] - PIZZOLANTE, A.C. - "Representação de Partes Parcialmente Observáveis de Sistema de Energia Elétrica". Tese de Mestrado - FEC-UNICAMP; Campinas, 1979.
- [3] - VILLARD, P. - "Estimation de l'état d'un réseau électrique HR. 10252/3 - Janvier 1973-SER-DER-DMO Electricité de France-Clamart-France.
- [4] - HANDSCHIN, E.S. and BONGERS, C. - "Theoretical and Practical Considerations in the Design of State Estimators of Electric Power Systems". Copos' 75 - Ed. SC. Savulescu Elsevier - Scient Publ. Co., pp. 104-120, 1976.
- [5] - PEREIRA, J.L.R. - "Um Método Robusto de Estimação Estática de Estados para Avaliação de Segurança Transiente". Tese de Mestrado - COPPE/UFRJ, 1978.
- [6] - GARCIA, A.V. - "Estimação estática em Sistemas de Potência, Utilizando Método Desacoplado". Tese de Mestrado FEC-UNICAMP, Campinas, 1977.

- [7] - FRED, C. SHWEPPE et al - "Power System Static-State Esti-  
matio", Part I - II. IEEE Trans. Vol. PAS 89, n° 1,  
January, 1970.
- [8] - HANDSCHIN, E. et alii - "Bad Data Analysis for Power  
Systems State Estimation for Eletric Power Systems".  
IEEE Trans. Power Apparatus Systems, 95(1): 208-215,  
Jan/Febr., 1976.
- [9] - R. DORAISWAMI - "An Algorithm for pre-filtering of Gross  
Measurement Erros in Power System Static State  
Estimation". Power System Computacional Conference  
Lausanne, Suiça, Julho, pp. 12-17, 1981.
- [10] - STAGG, C. W. & EL-ABIAD, A. H. - "Computer Methods in  
Power Systems Analysis. New York, McGraw-Hill, 1968.  
(McGraw-Hill series in Eletronic Systems).
- [11] - R. DORAISWAMI, J. L. R. PEREIRA - "A New Bad data Detection  
and Identification Algorithm" IEEE Trans. Reliability  
oct 1980.
- [12] - M. S. SACHDEV, S. A IBRAHIM, "A fast approximate technique  
for outage studies in power system planning and  
operation", IEEE Trans. Power App., 1974 pp 1133-1142.
- [13] - SIROUX, J. G et ADNET, M - "Calcul en temps réel des  
modules et des phases de tensions aux noeuds du réseau



de transport à partir des telemesures des puissances actives e réatives" - R.G.E, Vo/76 - March - April, 1967, pp 624-628.

- [14] - SCHWEPPE, F. C - WILDES, J. and RON, D. - "Power system static state estimation", Power System Eng. Group, MIT-REP 10, Nov 1968.
- [15] - HADJDU, L. P, ed. - "New developments in system state estimation and anomaly detection", Bonneville Power Administration, Contract 14-03-79968, Wolf Manaement Services, Palo Alto, California - Final Rep, October 1969.
- [16] - LARSON, R. E and HAJDU L. P. - "Potential applications and on-line implementation of power system state estimation", Wolf Management Services, Palo Alto, Calif, Final Rep., January 1969.
- [17] - SCHWEPPE F.C and HANDSCHIN, E. J. "Static Estimation in Electric Power Systems", Proc. of IEEE, Vol. 62, n° 7, July 1974, pp. 972-982.
- [18] - BROUSOLLE, F. "State Estimation in Power Systems: Detecting Bad Data Through the Sparse Matrix Method", IEEE Trans. Vol. PAS-97, n° 3, May/June 1978, pp. 678-682.