

## SEL – 5717 Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência

Prof. João Bosco A. London Junior  
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação - EESC - USP  
E-mail: jbalj@sc.usp.br

## Análise e Restauração de Observabilidade

### Etapas do Processo de Estimação de Estado em SEP

### Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado

- 1° Obtenção da topologia do sistema no modelo barra linha (isto é, o diagrama unifilar do SEP)
- 2° Análise e restauração da observabilidade
- 3° Estimação de estado
- 4° Processamento de erros grosseiros em medidas analógicas

## Objetivo

- Apresentar o problema de observabilidade, no contexto de estimação estática de estado em sistemas elétricos de potência, com o devido embasamento teórico, destacando os principais conceitos e definições

5

## Introdução

## Introdução

### ■ Definição do Problema

- O problema de observabilidade de Sistemas Elétricos de Potência (SEP) consiste em verificar se é possível estimar todas as variáveis de estado do SEP através das medidas disponíveis

7

## Introdução

### ■ Definição do Problema

- O problema de observabilidade de Sistemas Elétricos de Potência (SEP) consiste em verificar se é possível estimar todas as **variáveis de estado do SEP** através das medidas disponíveis

Tensões complexas  
nodais

8

## Introdução

### ■ Definição do Problema

- O problema de observabilidade de Sistemas Elétricos de Potência (SEP) consiste em verificar se é possível estimar todas as **variáveis de estado do SEP** através das medidas disponíveis

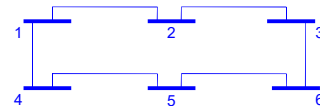
Tensões complexas nodais

- Estimação de Estado em SEP

9

## Introdução

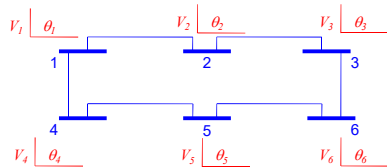
### ■ Estimação de Estado



10

## Introdução

### ■ Estimação de Estado

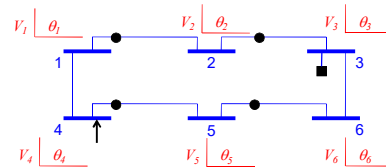


$x$  - vetor de variáveis de estado ( $N \times 1$ )

11

## Introdução

### ■ Estimação de Estado



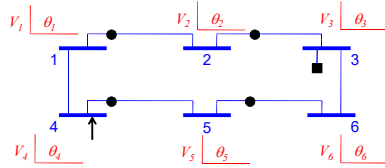
$x$  - vetor de variáveis de estado ( $N \times 1$ )

$z$  - vetor de medidas ( $m \times 1$ )

12

## Introdução

### ■ Estimação de Estado



### • Modelo de Medição

$$z = h(x^v) + w \quad \begin{cases} E\{w\} = 0 \\ E\{ww^T\} = W^{-1} \end{cases}$$

13

## Introdução

### ■ Estimador de Estado por MQP

#### ➤ Modelo de medição

$$z = h(x^v) + w$$

#### ➤ Solução iterativa da Equação Normal:

$$G(x^k)(x^{k+1} - x^k) = H^T(x^k)W[z - h(x^k)]$$

#### ➤ onde $x^k$ é o valor de $x$ na iteração $k$ e

$$H(x) = \partial h(x) / \partial x$$

#### ➤ é a matriz Jacobiana e

$$G(x^k) = H^T(x^k)WH(x^k)$$

#### ➤ é a matriz de informação ou matriz Ganho

14

## Introdução

### ■ Estimador de Estado por MQP

$$G(x^k)(x^{k+1} - x^k) = H^T(x^k)W[z - h(x^k)]$$

### ■ Para resolver a equação Normal:

#### ➤ $G(x^k)$ tem que ser não singular

$$G(x^k) = H^T(x^k)WH(x^k) \quad \begin{cases} W^{-1} \text{ é usualmente} \\ \text{suposta diagonal e} \\ \text{não singular} \end{cases}$$

15

## Introdução

### ■ Estimador de Estado por MQP

$$G(x^k)(x^{k+1} - x^k) = H^T(x^k)W[z - h(x^k)]$$

### ■ Para resolver a equação Normal:

#### ➤ $G(x^k)$ tem que ser não singular

$$G(x^k) = H^T(x^k)WH(x^k) \quad \begin{cases} W^{-1} \text{ é usualmente} \\ \text{suposta diagonal e} \\ \text{não singular} \end{cases}$$

### ■ Condição para observabilidade:

#### ➤ Matriz $H$ tem que ter posto completo

- ✓ Essa constatação conduz à definição de observabilidade algébrica

16

## Introdução

### ■ Análise de Observabilidade

$Z \rightarrow X$

17

## Introdução

### ■ Análise de Observabilidade

$Z \rightarrow X$

- Em caso afirmativo o sistema é dito observável como um todo
  - Estimação de Estado

18

## Introdução

### ■ Análise de Observabilidade

$Z \rightarrow X$

- Caso contrário, o sistema não é observável como um todo
  - Temos 2 opções:
    - ✓ **Identificar as Ilhas Observáveis** e estimar as suas variáveis de estado isoladamente (identificar e eliminar as medidas de injeção irrelevantes); ou
    - ✓ **Restaurar a observabilidade** (pseudo-medidas não redundantes, isto é, pseudo-medidas críticas)

## Introdução

### ■ Definições

- **Ilha observável** é um conjunto de barras do SEP entre as quais os fluxos podem ser determinados a partir das medidas disponíveis
- **Ramos observáveis** (**não observáveis**) são aqueles cujos fluxos **podem** (**não podem**) ser determinados (observados) a partir das medidas disponíveis

20

## Introdução

### Definições

- **Medidas de injeção irrelevantes** para observabilidade da rede são medidas incidentes a pelo menos um ramo não observável
- ✓ Medidas irrelevantes são **descartáveis** para estimação de estado das ilhas observáveis (devem ser eliminadas)

21

## Introdução

### Medidas de Injeção Irrelevantes

#### Modelo Linear

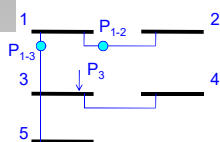
$$\left\{ \begin{aligned} P_{kl} &= \frac{\theta_k - \theta_l}{x_{kl}} \\ P_k &= \sum_{l \in \Omega_k} \left( \frac{\theta_k - \theta_l}{x_{kl}} \right) \end{aligned} \right.$$

22

## Introdução

### Medidas de Injeção Irrelevantes

#### Modelo Linear

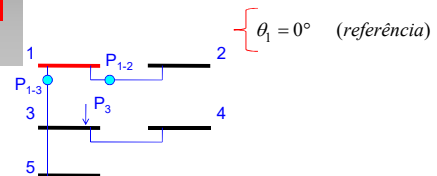


23

## Introdução

### Medidas de Injeção Irrelevantes

#### Modelo Linear

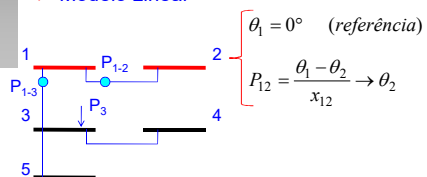


24

## Introdução

### Medidas de Injeção Irrelevantes

#### Modelo Linear

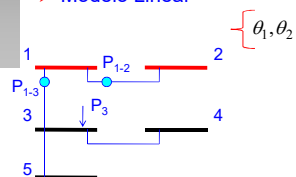


25

## Introdução

### Medidas de Injeção Irrelevantes

#### Modelo Linear

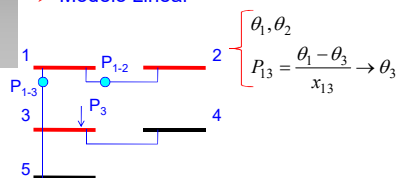


26

## Introdução

### Medidas de Injeção Irrelevantes

#### Modelo Linear

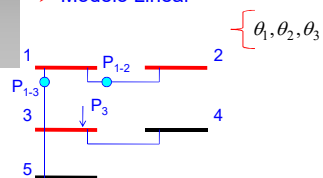


27

## Introdução

### Medidas de Injeção Irrelevantes

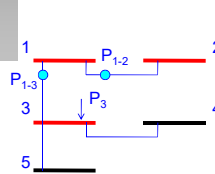
#### Modelo Linear



28

## Introdução

- Medidas de Injeção Irrelevantes
- Modelo Linear

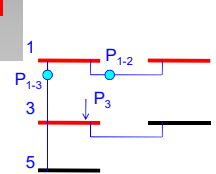


$$P_3 = \left( \frac{\theta_3 - \theta_1}{x_{13}} \right) + \left( \frac{\theta_3 - \theta_4}{x_{34}} \right) + \left( \frac{\theta_3 - \theta_5}{x_{35}} \right)$$

29

## Introdução

- Medidas de Injeção Irrelevantes
- Modelo Linear

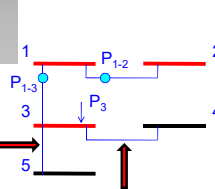


$$P_3 = \left( \frac{\theta_3 - \theta_1}{x_{13}} \right) + \left( \frac{\theta_3 - \theta_4}{x_{34}} \right) + \left( \frac{\theta_3 - \theta_5}{x_{35}} \right)$$

30

## Introdução

- Medidas de Injeção Irrelevantes
- Modelo Linear



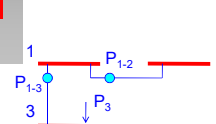
$$P_3 = \left( \frac{\theta_3 - \theta_1}{x_{13}} \right) + \left( \frac{\theta_3 - \theta_4}{x_{34}} \right) + \left( \frac{\theta_3 - \theta_5}{x_{35}} \right)$$

Ramos Não Observáveis

31

## Introdução

- Medidas de Injeção Irrelevantes
- Modelo Linear



$$P_3 = \left( \frac{\theta_3 - \theta_1}{x_{13}} \right) + \left( \frac{\theta_3 - \theta_4}{x_{34}} \right) + \left( \frac{\theta_3 - \theta_5}{x_{35}} \right)$$

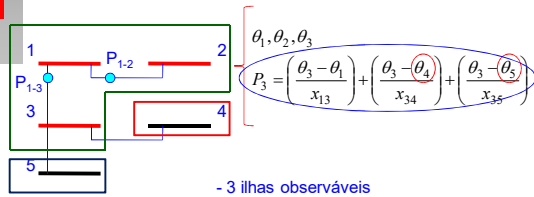
$P_3$  – Medida de Injeção Irrelevante para Observabilidade do SEP

32



## Introdução

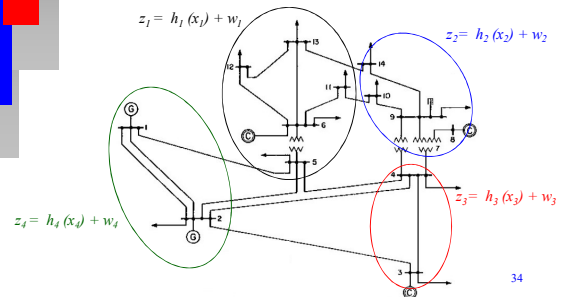
- Medidas de Injeção Irrelevantes
  - Modelo Linear



33

## Introdução

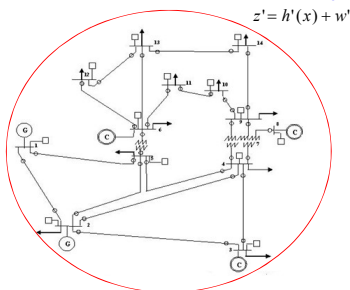
- Identificação das Ilhas Observáveis e Estimação de Estado de forma isolada



34

## Introdução

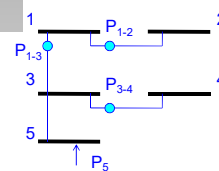
- Restauração da Observabilidade
  - Pseudo-medidas **não redundantes (críticas)**



35

## Introdução

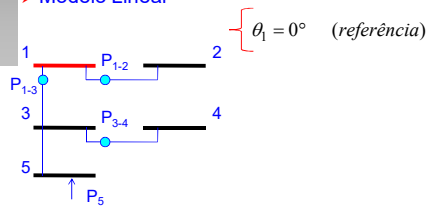
- Sistema Observável
  - Modelo Linear



## Introdução

Sistema Observável

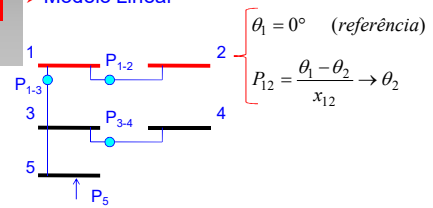
> Modelo Linear



## Introdução

Sistema Observável

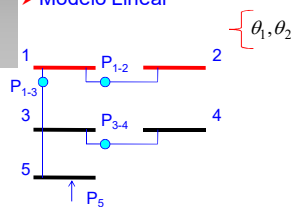
> Modelo Linear



## Introdução

Sistema Observável

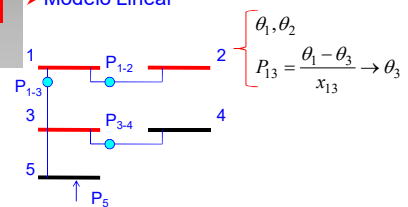
> Modelo Linear



## Introdução

Sistema Observável

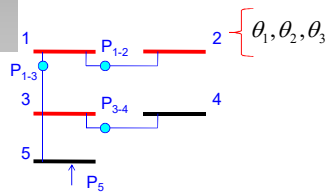
> Modelo Linear



## Introdução

Sistema Observável

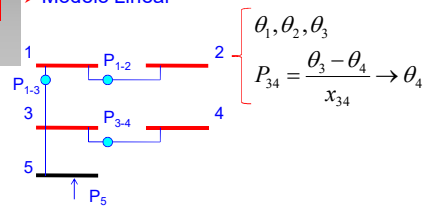
> Modelo Linear



## Introdução

Sistema Observável

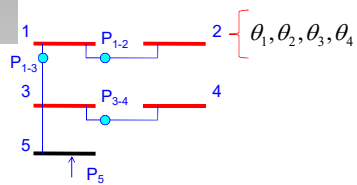
> Modelo Linear



## Introdução

Sistema Observável

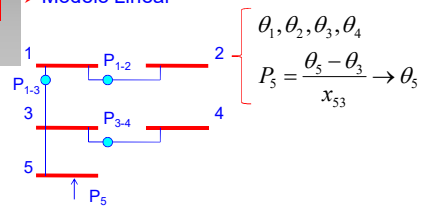
> Modelo Linear



## Introdução

Sistema Observável

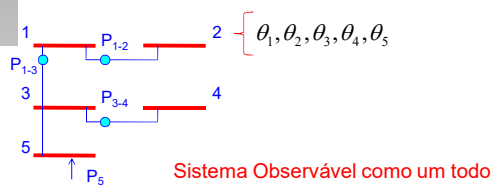
> Modelo Linear



## Introdução

Sistema Observável

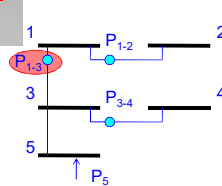
> Modelo Linear



## Introdução

Sistema Não Observável – Eliminando  $P_{1-3}$  (crítica)

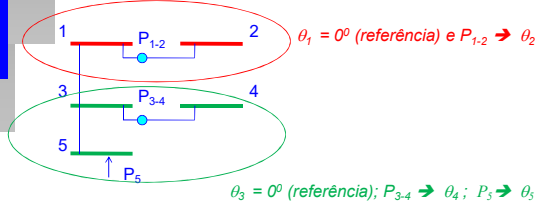
> Modelo Linear



## Introdução

Sistema Não Observável

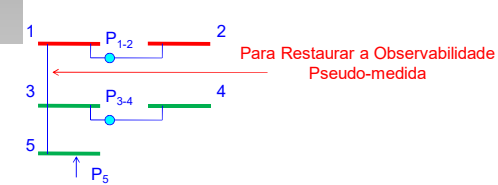
> Modelo Linear



## Introdução

Sistema Não Observável

> Modelo Linear

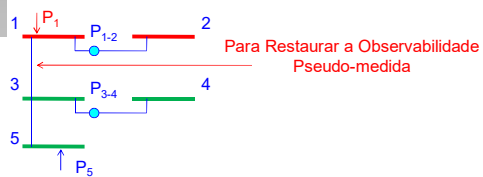


# Introdução

## Sistema Não Observável

> Modelo Linear

Para Restaurar a Observabilidade  
Pseudo-medida



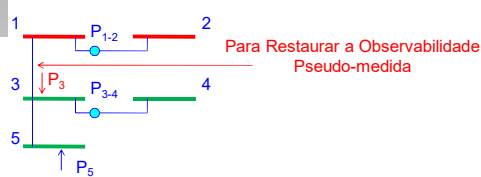
# Introdução

---

## Sistema Não Observável

➤ Modelo Linear

Para Restaurar a Observabilidade  
Pseudo-medida



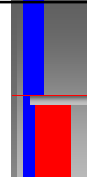
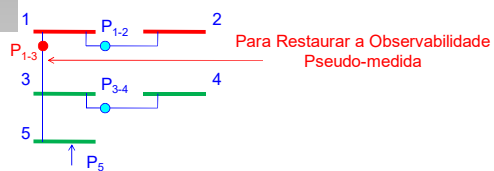
# Introdução

Sistema Não Observável

> Modelo Linear

Para Restaurar a Observabilidade  
Pseudo-medida

O diagrama ilustra um sistema não observável com cinco estados (1, 2, 3, 4, 5) e três pseudo-medidas ( $P_{1-2}$ ,  $P_{3-4}$ ,  $P_5$ ). Os estados 1, 2, 3 e 4 são representados por barras horizontais coloridas (vermelha, verde, verde, verde). O estado 5 é representado por uma barra horizontal verde. As pseudo-medidas são representadas por pontos azuis e setas azuis. A pseudo-medida  $P_{1-2}$  conecta os estados 1 e 2. A pseudo-medida  $P_{3-4}$  conecta os estados 3 e 4. A pseudo-medida  $P_5$  aponta para o estado 5. O texto 'Para Restaurar a Observabilidade Pseudo-medida' indica o propósito das pseudo-medidas.



# Introdução

- Importância da análise de observabilidade
  - Fase de projeto
    - Projeto e fortalecimento de sistemas de medição
  - Operação em tempo real
    - Durante a operação medidas podem se tornar momentaneamente indisponíveis, tornando o sistema não observável

52

- Importância da análise de observabilidade
  - Fase de projeto
    - Projeto e fortalecimento de sistemas de medição
  - Operação em tempo real
    - Durante a operação medidas podem se tornar momentaneamente indisponíveis, tornando o sistema não observável

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### Observabilidade de SEP: definições e teoria

#### ■ Definição (formal)

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

54

### Observabilidade de SEP: definições e teoria

#### ■ Definições de Observabilidade

- Observabilidade Algébrica
- Observabilidade Numérica
- Observabilidade Topológica

- ✓ KRUMPHOLZ, G.R.; CLEMENTS, K.A.; DAVIS, P.W. (1980). Power system observability: a practical algorithm using network topology. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, VOL. PAS-99, N°4, p. 1534-1542, Julho - Agosto

55

### Observabilidade de SEP: definições e teoria

#### ■ Observabilidade Algébrica

- Um SEP é algebricamente observável, com respeito a um conjunto de medidas  $M$ , se a matriz Jacobiana  $H$  tem posto igual ao número de variáveis de estado a serem estimadas

56

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

- Observabilidade Algébrica
  - Estimador por MQP

$$G(x^k)(x^{k+1} - x^k) = H^T(x^k)W[z - h(x^k)]$$

$$G(x^k) = H^T(x^k)WH(x^k) \begin{cases} W^{-1} \text{ é usualmente} \\ \text{suposta diagonal e} \\ \text{não singular} \end{cases}$$

57

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

- Observabilidade Algébrica
  - Estimador por MQP

$$G(x^k)(x^{k+1} - x^k) = H^T(x^k)W[z - h(x^k)]$$

$$G(x^k) = H^T(x^k)WH(x^k) \begin{cases} W^{-1} \text{ é usualmente} \\ \text{suposta diagonal e} \\ \text{não singular} \end{cases}$$

- ✓ Problemas numéricos → não convergência
  - A matriz H deve ser ainda numericamente bem condicionada, isto é, distante o suficiente da sua região de singularidade

58

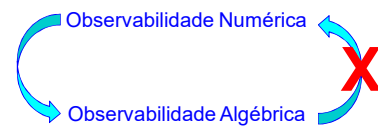
## Observabilidade de SEP: definições e teoria

- Observabilidade Numérica

- Um SEP é dito “numericamente” observável, com relação a um conjunto de medidas M, se for possível fazer uma estimativa para o vetor de variáveis de estado, através da solução iterativa da equação normal, partindo do flat start (valores iniciais iguais a 1 p.u. e 0 radianos para os módulos e ângulos de fase das tensões nodais, respectivamente)

59

## Observabilidade de SEP: definições e teoria



60

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Observabilidade Topológica

- Explora o desacoplamento P $\theta$  - QV e baseia-se na relação entre medidas e o grafo da rede, cujas arestas e vértices representam os ramos e as barras do sistema, respectivamente

61

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Observabilidade Topológica

- Explora o **desacoplamento P $\theta$  - QV** e baseia-se na relação entre medidas e o **grafo da rede**, cujas arestas e vértices representam os ramos e as barras do sistema, respectivamente

62

## Desacoplamento P $\theta$ - QV

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Desacoplamento P $\theta$ - QV

- As sensibilidades ( $\partial P/\partial \theta$ ) e ( $\partial Q/\partial V$ ) são mais intensas que as sensibilidades ( $\partial P/\partial V$ ) e ( $\partial Q/\partial \theta$ )

$$H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix}$$

64



## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Desacoplamento Pθ - QV

- As sensibilidades  $(\partial P/\partial \theta)$  e  $(\partial Q/\partial V)$  são mais intensas que as sensibilidades  $(\partial P/\partial V)$  e  $(\partial Q/\partial \theta)$

$$H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix}$$

65

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Desacoplamento Pθ - QV

- As sensibilidades  $(\partial P/\partial \theta)$  e  $(\partial Q/\partial V)$  são mais intensas que as sensibilidades  $(\partial P/\partial V)$  e  $(\partial Q/\partial \theta)$
- Decomposição do problema em dois sub problemas separados
- Modelos desacoplados
  - ✓ Modelo Pθ ( $z_p, \theta$ )
  - ✓ Modelo QV ( $z_{qv}, V$ )

66

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Modelo Completo

- O número de variáveis de estado a serem estimadas para um sistema de potência com  $n$  barras é igual a  $(2n-1)$ , sendo:
  - $(n-1)$  - ângulos de fase
  - $n$  - magnitudes de tensão
- Assim, para realizar a análise de observabilidade de um sistema de potência é necessário verificar se é possível, através do conjunto de medidas disponível, estimar as suas  $(2n-1)$  variáveis de estado

67

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Desacoplamento Pθ - QV

- Pθ observável
  - ✓ Para determinar se o sistema é Pθ observável, importa verificar se é possível, considerando apenas as medidas de potência ativa, estimar os ângulos de fase de  $(n-1)$  barras desse sistema

$$\text{posto}(H_{p\theta}) = n - 1$$

- QV observável
  - ✓ Para determinar se o sistema é QV observável, releve verificar se é possível, considerando apenas as medidas de potência reativa e as de magnitude de tensão, estimar as magnitudes de tensão em todas as  $n$  barras desse sistema

$$\text{posto}(H_{QV}) = n$$

68

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Desacoplamento $P\theta$ - QV

- Em geral os problemas de observabilidade devem ser analisados separadamente
- Para sistemas de medição, em que as medidas de potência ativa e reativa são realizadas aos pares, a observabilidade  $P\theta$  garante a observabilidade QV, desde que exista pelo menos uma medida de magnitude de tensão
- ✓ Para sistemas de medição com essas características, a análise de observabilidade pode ser realizada considerando apenas o desacoplamento  $P\theta$

69

## Teoria de Grafos e conceitos Topológicos

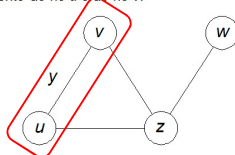
## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Conceitos da Teoria de Grafo

Um grafo  $G(V, A)$  é definido pelo par  $V$  e  $A$ , onde:

- $V$  – conjunto de vértices ou nós do grafo;
- $A$  – conjunto de pares de nós não-ordenados: as arestas do grafo.

Se  $u$  e  $v$  são dois nós de um grafo e se o par  $\{u, v\}$  é uma aresta denotada por  $y$ , diz-se que  $y$  conecta  $u$  e  $v$ , como pode ser visto na Figura 4.1. Neste caso, a aresta  $\{u, v\}$  é dita ser incidente ao nó  $u$  e ao nó  $v$ .



71

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Conceitos da Teoria de Grafo

- Dado um grafo  $G$ , uma sequência alternada de vértices e arestas de  $G$ , que se inicia e termina em vértices, tal que cada aresta é incidente no vértice que a precede e no vértice que a segue, é denominada um **caminho** entre o vértice inicial e o vértice final
- Um **ciclo** é um caminho em que o vértice inicial coincide com o vértice final
- Uma **árvore** de  $G$  é um subgrafo que não possui ciclos e é conexo (isto é, existe um caminho entre cada par de seus vértices)
- Uma **árvore geradora** de  $G$  se caracteriza por possuir o mesmo conjunto de vértices que  $G$

72

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Conceitos Topológicos

- O **grafo da rede** associado a um SEP é definido como um **grafo** cujos **vértices** correspondem às **barras** do SEP e cujas **arestas** correspondem aos **ramos** (linhas de transmissão e transformadores), conforme representado no diagrama unifilar de um SEP
- Uma **árvore geradora** do grafo da rede é dita **observável (ou de posto completo)**, com respeito a um conjunto de medidas, se for possível associar uma medida deste conjunto a cada aresta da árvore, sem que existam duas ou mais arestas associadas à mesma medida

73

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Observabilidade Topológica

- Um SEP é "topologicamente" observável, com relação a um conjunto de medidas  $M$ , unicamente se existir uma árvore geradora observável (AGO) do grafo da rede associado a esse SEP

74

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Observabilidade Topológica

- Busca de uma AGO
  - ✓ Caminha pela topologia do SEP (grafo da rede) associando, para cada ramo, uma medida distinta
  - Regra de Associação de medidas às arestas do grafo da rede

75

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Observabilidade Topológica

- Regra de Associação de medidas às arestas do grafo da rede
  - ✓ Estruturas das matrizes  $H_{P\theta}$  e  $H_{QV}$ 
    - Uma medida de fluxo produzirá uma equação que envolverá apenas as tensões complexas das barras terminais da linha onde é feita a medida
    - O efeito de uma medida de injeção é inter-relacionar a tensão complexa da barra onde ela foi medida com as tensões de todas as barras a ela conectadas
    - Uma medida de tensão traz informação apenas da barra onde a medição foi realizada

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Observabilidade Topológica

- Regra de Associação de medidas às arestas do grafo da rede

- ✓ Uma medida **z** pode ser atribuída a uma aresta **a**, do grafo da rede, se **z** for uma **medida de fluxo** no ramo correspondente àquela aresta, ou uma **medida de injeção**, em uma das barras terminais daquele ramo

77

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Observabilidade Topológica

- Regra de Associação de medidas às arestas do grafo da rede

- ✓ Medida de Tensão

- ✓ Em virtude de essa medida dar informação da magnitude de tensão na barra onde foi realizada, a mesma pode ser representada, para análise de observabilidade topológica, como uma medida de **fluxo de potência reativa** em um **ramo fictício** de susceptância unitária, conectando a barra, onde a medida de magnitude de tensão ocorre, a uma barra adicional representando o nó terra (referência de tensão)

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Observabilidade Topológica

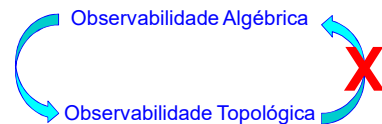
- Regra de Associação de medidas às arestas do grafo da rede

- ✓ Dessa forma, a análise de observabilidade topológica realiza-se considerando apenas dois tipos de medidas, medidas de fluxo e de injeção

79

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

- KRUMPHOLZ, G.R.; CLEMENTS, K.A.; DAVIS, P.W. (1980). Power system observability: a practical algorithm using network topology. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, VOL. PAS-99, N°4, p. 1534-1542, Julho - Agosto



80

## Métodos

### Observabilidade de SEP: definições e teoria

- Métodos Topológicos
- Métodos Numéricos

82

## Métodos Topológicos

### Observabilidade de SEP: definições e teoria

- Métodos Topológicos
  - Baseiam-se no conceito de Observabilidade Topológica
    - ✓ Busca de uma AGO
  - Requerem a criação de rotinas específicas, que não exigem cálculos, mas que são de natureza combinatória e complexa

84

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Topológicos

- Baseiam-se no conceito de Observabilidade Topológica

✓ Busca de uma AGO

- Requerem a criação de rotinas específicas, que não exigem cálculos, mas que são de natureza combinatória e complexa

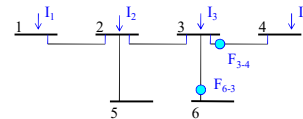
Medidas de Injeção

85

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Topológicos

- Exemplo de análise (modelo P0) - Observável

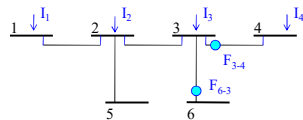


86

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Topológicos

- Exemplo de análise (modelo P0) - Observável



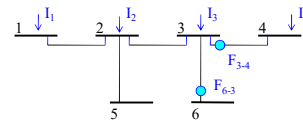
- Busca de uma AGO

87

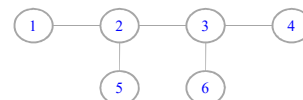
## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Topológicos

- Exemplo de análise (modelo P0) - Observável



- Busca de uma AGO

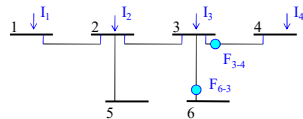


88

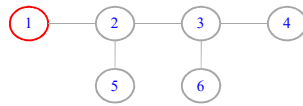
## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### Métodos Topológicos

- Exemplo de análise (modelo P0) - Observável



- Busca de uma AGO

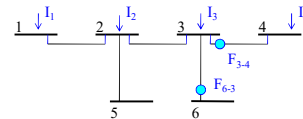


89

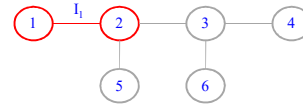
## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### Métodos Topológicos

- Exemplo de análise (modelo P0) - Observável



- Busca de uma AGO

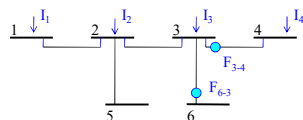


90

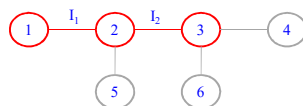
## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### Métodos Topológicos

- Exemplo de análise (modelo P0) - Observável



- Busca de uma AGO

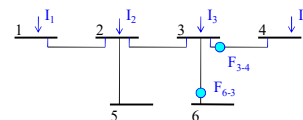


91

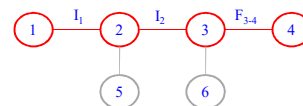
## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### Métodos Topológicos

- Exemplo de análise (modelo P0) - Observável



- Busca de uma AGO

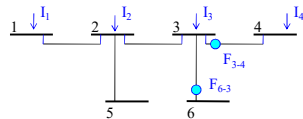


92

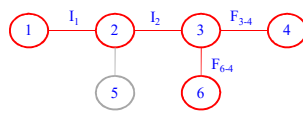
## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Topológicos

- Exemplo de análise (modelo P0) - Observável



- Busca de uma AGO

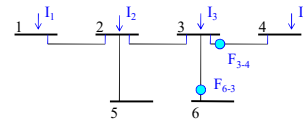


93

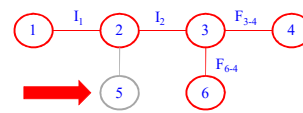
## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Topológicos

- Exemplo de análise (modelo P0) - Observável



- Busca de uma AGO ➔ Não encontrou uma AGO

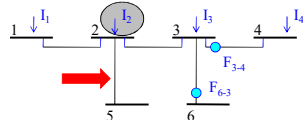


94

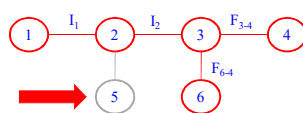
## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Topológicos

- Exemplo de análise (modelo P0) - Observável



- Busca de uma AGO ➔ Não encontrou uma AGO

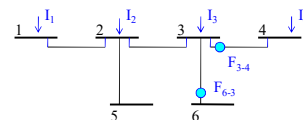


95

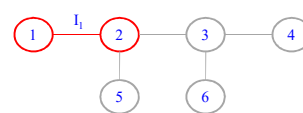
## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Topológicos

- Exemplo de análise (modelo P0) - Observável



- Busca de uma AGO



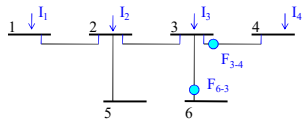
96



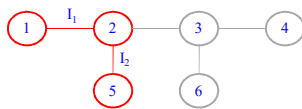
## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### Métodos Topológicos

- Exemplo de análise (modelo P0) - Observável



- Busca de uma AGO

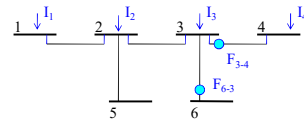


97

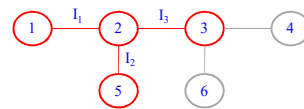
## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### Métodos Topológicos

- Exemplo de análise (modelo P0) - Observável



- Busca de uma AGO

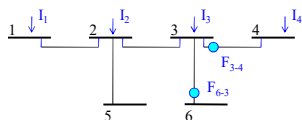


98

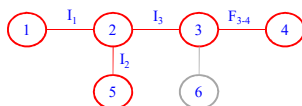
## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### Métodos Topológicos

- Exemplo de análise (modelo P0) - Observável



- Busca de uma AGO

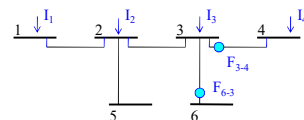


99

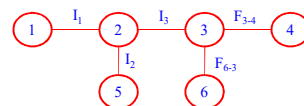
## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### Métodos Topológicos

- Exemplo de análise (modelo P0) - Observável



- Busca de uma AGO → Sistema Observável

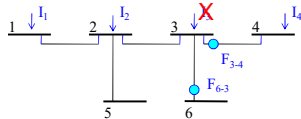


100

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Topológicos

- Exemplo de análise (modelo P0) – Não Observável

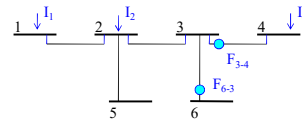


101

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Topológicos

- Exemplo de análise (modelo P0) – Não Observável



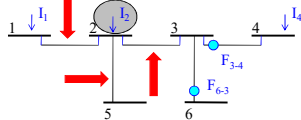
- Busca de uma AGO

102

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Topológicos

- Exemplo de análise (modelo P0) – Não Observável



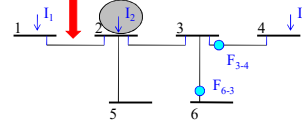
- Busca de uma AGO

103

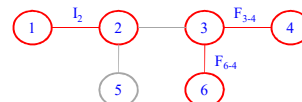
## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Topológicos

- Exemplo de análise (modelo P0) – Não Observável



- Busca de uma AGO –  $I_2$  – Ramo (1 - 2)

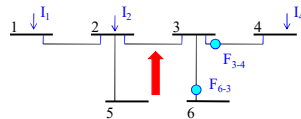


104

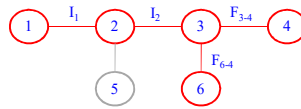
## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Topológicos

- Exemplo de análise (modelo P0) – Não Observável



- Busca de uma AGO:  $I_2$  - Ramo (2 – 3)

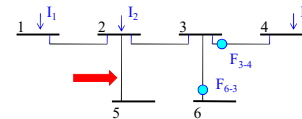


105

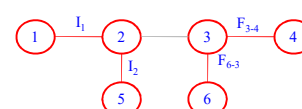
## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Topológicos

- Exemplo de análise (modelo P0) – Não Observável



- Busca de uma AGO:  $I_2$  – Ramo (2 – 5)

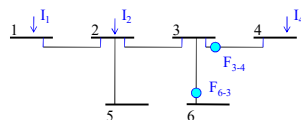


106

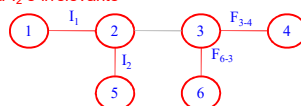
## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Topológicos

- Exemplo de análise (modelo P0) – Não Observável



- Busca de uma AGO ➔ Sistema Não Observável
- Medida  $I_2$  é irrelevante

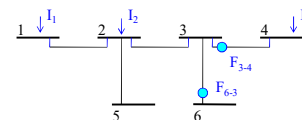


107

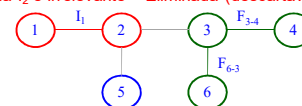
## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Topológicos

- Exemplo de análise (modelo P0) – Não Observável



- Busca de uma AGO ➔ Sistema Não Observável
- Medida  $I_2$  é irrelevante – Eliminada (descartável) - Ilhas

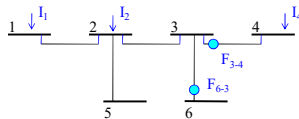


108

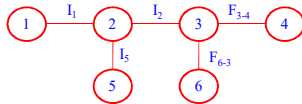
## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Topológicos

- Exemplo de análise (modelo P0) – Não Observável



- Busca de uma AGO → Sistema Não Observável
- Restauração da Observabilidade –  $I_5$



109

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Topológicos

- Referências

- KRUMPHOLZ, G.R.; CLEMENTS, K.A.; DAVIS, P.W. Power system observability: a practical algorithm using network topology. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 4, p. 1534- 1542, 1980
- CLEMENTS, K.A.; KRUMPHOLZ, G.R.; DAVIS, P.W. Power system state estimation with measurement deficiency: an algorithm that determines the maximal observable subnetwork. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, VOL. PAS- 101, N°9, p.3044- 3052, Setembro, 1982

110

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Topológicos

- Referências

- QUINTANA, V.H.; SIMOES-COSTA, A.; MANDEL, A. Power system topological observability using a direct graph-theoretic approach. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS 101, n°.3, p.617-626, 1982
- MORI, H.; TSUZUKI, S. A fast method for topological observability analysis using a minimum spanning tree technique. IEEE Transactions on Power Systems, VOL. 6, N°2, p. 491 - 500, 1991

111

## Métodos Numéricos

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Numéricos

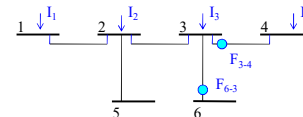
- São geralmente de mais fácil implantação em computador, já que em sua maioria visam à utilização de rotinas já disponíveis nos programas destinados à estimação de estado. Entretanto, estão sujeitos a erros numéricos
- Usualmente se baseiam no processo de fatoração triangular de matrizes (Ganho, Jacobiana, Gram, etc.)

113

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Numéricos

- Exemplo de análise (modelo P0) - Observável

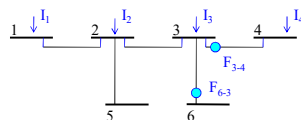


114

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Numéricos

- Exemplo de análise (modelo P0) - Observável



- Fatoração Triangular da Matriz Jacobiana  $H$  do Estimador por MQP

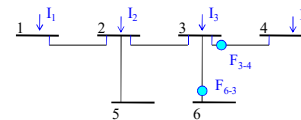
$$\text{Posto}(H_{P0}) = n - 1 = 6 - 1 = 5$$

115

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Numéricos

- Exemplo de análise (modelo P0) - Observável



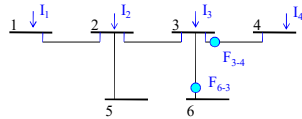
- $H^T$  ( $X_{km} = 1 \text{ p.u.}$ )

	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$F_{3-4}$	$F_{6-3}$	$I_4$
$\theta_1$	1	-1	0	0	0	0
$\theta_2$	-1	3	-1	0	0	0
$H^T = \theta_3$	0	-1	3	1	-1	-1
$\theta_4$	0	0	-1	-1	0	1
$\theta_5$	0	-1	0	0	0	0
$\theta_6$	0	0	-1	0	1	0

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### Métodos Numéricos

- Exemplo de análise (modelo P0) - Observável



- $H_F^T \rightarrow$  Sistema Observável

	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$F_{3,4}$	$F_{6,3}$	$I_4$
$\theta_1$	1	-1	0	0	0	0
$\theta_2$	0	2	-1	0	0	0
$H_F^T =$	$\theta_3$	0	0	2.50	1	-1
	$\theta_4$	0	0	0	-0.60	-0.40
	$\theta_5$	0	0	0	0	-0.33
	$\theta_6$	0	0	0	0	0

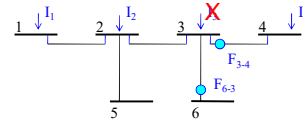
$$H_F^T(6,6)=0$$

117

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### Métodos Numéricos

- Exemplo de análise (modelo P0) - Não Observável

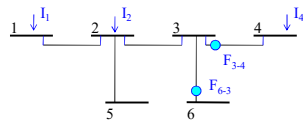


118

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### Métodos Numéricos

- Exemplo de análise (modelo P0) - Não Observável

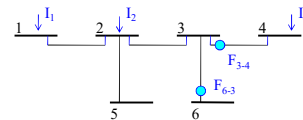


119

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### Métodos Numéricos

- Exemplo de análise (modelo P0) - Não Observável



- $H^T (X_{km} = 1 \text{ p.u.})$

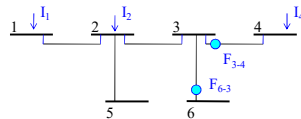
	$I_1$	$I_2$	$F_{3,4}$	$F_{6,3}$	$I_4$
$\theta_1$	1	-1	0	0	0
$\theta_2$	-1	3	0	0	0
$H^T =$	$\theta_3$	0	-1	1	-1
	$\theta_4$	0	0	-1	0
	$\theta_5$	0	-1	0	0
	$\theta_6$	0	0	0	1

120

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### Métodos Numéricos

- Exemplo de análise (modelo P0) – Não Observável



- $H_F^T \rightarrow$  Sistema Não Observável

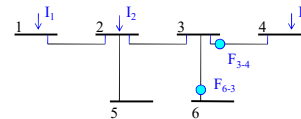
	$I_1$	$I_2$	$F_{3,4}$	$F_{6,3}$	$I_4$
$\theta_1$	1	-1	0	0	0
$\theta_2$	(1)	2	0	0	0
$H_F^T = \theta_3$	0	(0,50)	1	-1	-1
$\theta_4$	0	0	(1)	-1	0
$\theta_5$	0	(0,50)	0	0	0
$\theta_6$	0	0	0	(1)	0

$H_F^T(5,5)=0$

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### Métodos Numéricos

- Exemplo de análise (modelo P0) – Não Observável



- $H_F^T \rightarrow$  Restauração da Observabilidade (testando  $I_3$ )

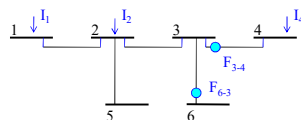
	$I_1$	$I_2$	$F_{3,4}$	$F_{6,3}$	$I_4$
$\theta_1$	1	-1	0	0	0
$\theta_2$	(1)	2	0	0	0
$H_F^T = \theta_3$	0	(0,50)	1	-1	-1
$\theta_4$	0	0	(1)	-1	0
$\theta_5$	0	(0,50)	0	0	0
$\theta_6$	0	0	0	(1)	0

$H_F^T(5,5)=0$

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### Métodos Numéricos

- Exemplo de análise (modelo P0) – Não Observável



- $H_F^T \rightarrow$  Restauração da Observabilidade (testando  $I_5$ )

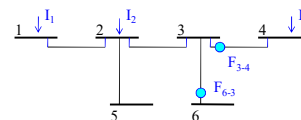
	$I_1$	$I_2$	$F_{3,4}$	$F_{6,3}$	$I_4$	$I_5$
$\theta_1$	1	-1	0	0	0	0
$\theta_2$	(1)	2	0	0	0	-1
$H_F^T = \theta_3$	0	(0,50)	1	-1	-1	0
$\theta_4$	0	0	(1)	-1	0	0
$\theta_5$	0	(0,50)	0	0	0	1
$\theta_6$	0	0	0	(1)	0	0

123

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### Métodos Numéricos

- Exemplo de análise (modelo P0) – Não Observável



- $H_F^T \rightarrow$  Restauração da Observabilidade (testando  $I_5$ )

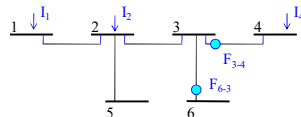
	$I_1$	$I_2$	$F_{3,4}$	$F_{6,3}$	$I_4$	$I_5$
$\theta_1$	1	-1	0	0	0	0
$\theta_2$	(1)	2	0	0	0	-1
$H_F^T = \theta_3$	0	(0,50)	1	-1	-1	-0,50
$\theta_4$	0	0	(1)	-1	0	-0,50
$\theta_5$	0	(0,50)	0	0	0	0,50
$\theta_6$	0	0	0	(1)	0	-0,50

$H_F^T(5,6) \neq 0$  124

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Numéricos

#### ➤ Exemplo de análise (modelo P0) – Não Observável



#### ➤ $H_F^T \rightarrow$ Restauração da Observabilidade (testando $I_3$ )

	$I_1$	$I_2$	$F_{3,4}$	$F_{6,3}$	$I_3$	$I_4$
$\theta_1$	1	-1	0	0	0	0
$\theta_2$	(1)	2	0	0	-1	0
$H_F^T =$ $\theta_3$	0	(0,50)	1	-1	-0,50	-1
$\theta_4$	0	0	(1)	-1	-0,50	0
$\theta_5$	0	(0,50)	0	0	0,50	0
$\theta_6$	0	0	0	(1)	0	0

$$H_F^T(6,6)=0$$

125

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Numéricos

#### ➤ Referências

- MONTICELLI, A.; WU, F.F. Network observability: Identification of observable islands and measurement placement. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 5, p. 1035-1041, 1985
- MONTICELLI, A.; WU, F.F. Network observability: Theory. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 5, p. 1042-1048, 1985
- BRETAS, N.G. Network Observability: Theory and algorithms based on triangular factorization and path graph concepts. IEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution, VOL. 143, N°1, p. 123- 128, 1996

126

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Numéricos

#### ➤ Referências

- CASTILHO, E.; CONEJO, A.J.; PRUNEDA, R.E.; Solares, C. Observability analysis in state estimation: a unified numerical approach. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.21, No.2, pp. 877- 886, 2006
- LONDON, J.B.A.; ALBERTO, L. F. C.; BRETAS, Analysis of measurement set qualitative characteristics for state estimation purposes. IET Generation, Transmission & Distribution, Vol.1, pp. 39-45, 2007
- ALMEIDA, M.C.; ASADA, E.N.; GARCIA, A.V. Power Systems Observability Analysis Based on Gram Matrix and Minimum Norm Solution. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.23, No.4, pp. 1611- 1618, 2008

127

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

### ■ Métodos Híbridos

#### ➤ Referência

- CONTAXIS, G.C.; KORRES, G.N. A reduced model for power system observability analysis and restoration. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No.4, p. 1411-1417, 1988

128



## Observabilidade de SEP: definições e teoria

➤ DE ALMEIDA, M. C.; GARCIA, A. V.; ASADA, E. N. Regularized Least Squares Power System State Estimation. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, No.1, p. 290-297, 2012

- ✓ Uma nova formulação do estimador por MQP que possibilita a estimação de estado mesmo para sistemas não observáveis
- Considera a existência de medidas (reais ou pseudo) de tensão complexa em todas as barras do SEP

129

## Observabilidade de SEP: definições e teoria

➤ DE ALMEIDA, M. C.; GARCIA, A. V.; ASADA, E. N. Regularized Least Squares Power System State Estimation. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, No.1, p. 290-297, 2012

- Relaciona a observabilidade do SEP com a precisão das estimativas dos fluxos de potência ativa
- Se o sistema não for observável, a identificação de ilhas observáveis é realizada através da análise das variâncias das estimativas dos fluxos de potência ativa

## SEL – 5717 Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência

Prof. João Bosco A. London Junior  
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação - EESC - USP  
E-mail: jbalj@sc.usp.br