



GOP/011

21 a 26 de Outubro de 2001
Campinas - São Paulo - Brasil

**GRUPO IX
ESTUDOS DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS**

**PERDA IMINENTE DE OBSERVABILIDADE NA ESTIMAÇÃO DE ESTADO
EM CENTROS DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS**

Milton B. Do Coutto Filho*
UFF

Julio C. Stacchini de Souza
UFF

Flavia M. F. Oliveira
UFF/Furnas

Marcus Th. Schilling
UFF

RESUMO

A redundância dos dados é um dos principais ingredientes para o sucesso da função Estimação de Estado em Centros de Operação de Sistemas. Com um nível adequado de redundância, pode-se lidar com o problema da detecção, identificação e eliminação de erros grosseiros de medição, bem como evita-se que a perda temporária de medidas comprometa a capacidade de supervisão do sistema (observabilidade) e a qualidade/confiabilidade das estimativas produzidas. Este Informe Técnico trata do problema da identificação de medidas e conjuntos críticos, indicando assim locais onde há perda iminente de observabilidade para a Estimação de Estado. Para tal, um algoritmo numérico, simples, de fácil implementação, independente do estimador instalado, é proposto e testado usando-se o sistema IEEE-14 barras, de forma a evidenciar sua eficiência computacional e confiabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: observabilidade; medidas críticas; conjuntos críticos; estimação de estado.

1.0 - INTRODUÇÃO

Mudanças ocorridas no setor elétrico alteraram significativamente a forma de atuação das empresas de energia elétrica. Tais mudanças originam-se principalmente no desejo governamental de privatizar o setor, justificado em parte pelo atendimento a consumidores que buscam por mais de uma opção de fornecimento do serviço, contratado a preços atraentes. Está surgindo então um ambiente de negócios, com novas regras de conduta, em essência marcado pela competição de seus partícipes que procuram entregar mais mercadorias (blocos de energia), disponíveis em espaço de tempo mais curto, usando menos recursos (capital, pessoal, instalações e equipamentos). No que concerne aos Centros de Operação de Sistemas, uma nova geração de ferramentas para Sistemas de Gerenciamento de

Energia está por ser projetada [1], levando em conta aspectos tais como: muito pouco tempo para reunir dados provenientes de diversas fontes, assim como para corrigir possíveis erros; impossibilidade para realizar processos de ajuste de algoritmos que algumas vezes falham na convergência ou então produzem resultados matematicamente corretos, mas sem significado prático; realização de cálculos que refletem os impactos de custo e risco de cada caminho tomado para decisão.

A Estimação de Estado (EE) é uma função universalmente estabelecida em sistemas de potência, estando presente no projeto e implementação de qualquer Sistema de Gerenciamento de Energia. Por ser um campo fértil de pesquisa, a EE tem evoluído ao longo dos anos [2]. Recentemente, a necessidade de novos modelos e mudanças trazidas pelos aspectos anteriormente descritos deslocaram o foco da pesquisa em EE para um refinamento do processo de extração de informação, onde todos os dados redundantes disponíveis (telemetrados, previstos, difusos, etc.) são utilizados [3,4].

A função EE compreende aplicativos responsáveis pela construção de uma base de dados completa e confiável a ser utilizada por funções de segurança e otimização [5]. Basicamente, a EE atua como um filtro para: suavizar erros estatisticamente pequenos inerentes à medição; e suprimir erros grosseiros, devidos a um funcionamento temporariamente inadequado do sistema de aquisição de dados. Como parte do processo de estimação, determina-se também a configuração atual da rede elétrica e sua observabilidade [6].

O problema de estimação é formulado assumindo-se que: (i) os erros das medidas recebidas (fluxos, injeções, magnitudes de tensões) são estatisticamente pequenos; (ii) a redundância dos dados é adequada; (iii) a configuração e parâmetros da rede estão corretos. Frequentemente, tais hipóteses não são de

* Universidade Federal Fluminense - Instituto de Computação - Rua Passo da Pátria, 156 - Bloco E, sala 350 - 22210-240, Niterói, RJ Endereço eletrônico: mbrown@ic.uff.br Tel.: (+21) 717-0970 Fax: (+21) 717-0812

todo verdadeiras, o que tem motivado pesquisadores a estudar a EE cuidadosamente.

A redundância dos dados é um dos principais ingredientes para o sucesso da EE [7]. Com um nível adequado de redundância, pode-se lidar com o problema da detecção, identificação e eliminação de erros grosseiros de medição, bem como evita-se que a perda temporária de medidas comprometa a capacidade de supervisão do sistema (observabilidade) e a qualidade/confiabilidade das estimativas produzidas. Avalia-se o nível de redundância levando em conta o número, tipo e localização dos pontos de medição.

Sistemas de medição altamente redundantes são sempre desejáveis. Uma vez que a quantidade de dados está diretamente relacionada ao investimento em equipamentos de medição e transmissão de informações, muitas vezes a redundância sofre cortes quando da revisão gerencial de alocação de fundos. Por outro lado, durante a operação dos sistemas, mudanças na configuração da rede ou um funcionamento temporariamente inadequado do sistema de aquisição de dados - diretamente acarretando perda de dados ou levando rotinas de validação a eliminar medidas espúrias - reduzem o nível de redundância para a EE. Até mesmo *níveis críticos* podem ser alcançados, caracterizando situações de *perda iminente de observabilidade* e conseqüente desempenho inadequado de rotinas de processamento de erros grosseiros. Tais níveis de redundância estão associados à presença de medidas e conjuntos críticos [8]. Uma medida torna-se *crítica* se sua ausência do conjunto de dados processados levar a rede supervisionada à *perda de observabilidade*. Um *conjunto crítico* é definido como sendo aquele formado por um grupo de medidas no qual a remoção de qualquer uma destas torna todas as remanescentes do grupo *medidas críticas*.

O presente Informe Técnico trata do problema da identificação de medidas e conjuntos críticos, indicando assim locais onde há perda iminente de observabilidade para a EE. Deve-se destacar que a maioria dos aplicativos de EE disponíveis comercialmente atuam de forma corretiva, i.e. restauram a condição anterior à perda de observabilidade, introduzindo pseudomedidas ou realizam a estimação nas ilhas observáveis resultantes da perda da observabilidade global. Esses aplicativos não são capazes de informar ao operador do sistema sobre as condições de perda iminente de observabilidade. A importância deste problema torna-se marcante no novo ambiente de atuação das empresas do setor elétrico, considerando que novos sistemas de medição estão sendo construídos, outros revistos para oferecer uma melhor cobertura da rede supervisionada, ou ainda, ampliados para atingir expansões da mesma. Um algoritmo numérico para resolver tal problema é proposto e testado no sistema IEEE-14 barras, de forma a evidenciar sua eficiência computacional e confiabilidade.

2.0 - ESTIMAÇÃO DE ESTADO

Nesta seção, de forma sucinta, serão apresentados aspectos teóricos básicos da função EE relacionados ao problema de se verificar a perda iminente de observabilidade, objetivo central do presente trabalho. De forma a simplificar o problema, será suficiente adotar aqui a modelagem linear para caracterizar a tarefa de estimar o estado do sistema.

Estimador Linear

O estado operativo do sistema e sua observação (medidas) se relacionam através da seguinte equação:

$$z = Hx + v \quad (1)$$

onde x e z são vetores de estado ($n \times 1$) e de medidas ($m \times 1$); H matriz Jacobiano do sistema ($m \times n$), obtida através da linearização das equações de fluxo de potência para a configuração da rede atual; v vetor de ruído Gaussiano, com média zero e matriz de covariância R . As componentes do vetor de estado x são os ângulos (θ) e as magnitudes das tensões nodais (V), enquanto que fluxos e injeções ativas/reactivas e magnitudes de tensão formam o vetor das medidas.

Função-Objetivo

Usualmente, o problema de EE tem sido formulado através do Método dos Mínimos Quadrados Ponderados pela seguinte função-objetivo:

$$J(x) = [z - Hx]^t R^{-1} [z - Hx] \quad (2)$$

Processo de Filtragem

O estado \hat{x} que minimiza $J(x)$ pode ser obtido por:

$$H^t R^{-1} [z - H\hat{x}] = 0 \quad (3)$$

$$\hat{x} = G^{-1} H^t R^{-1} z \quad (4)$$

onde $G = H^t R^{-1} H$ é conhecida por matriz de ganho do processo de estimação.

Análise de Resíduos

O vetor de resíduos r , definido como sendo a diferença entre z e as correspondentes quantidades filtradas $\hat{z} = H\hat{x}$, é normalizado:

$$r_N(i) = |r(i)| / \sigma_E(i) \quad (5)$$

$$E = R - HG^{-1}H^t \quad (6)$$

onde $\sigma_E(i) = \sqrt{E(i,i)}$ é o desvio-padrão da i -ésima componente do vetor-resíduo. Violações de elementos de r_N a um limite pré-determinado indicam a presença de erros grosseiros.

3.0 - REDUNDÂNCIA

O termo redundância refere-se a um número de medidas superior ao suficiente para definir completamente o estado do sistema. Considerando a configuração da rede supervisionada, projeta-se um sistema de medição para a EE com base nos seguintes requisitos:

- **Observabilidade** - EE realizada no sistema como um todo;
- **Confiabilidade** - Detecção, identificação e supressão de erros grosseiros sempre possível;
- **Qualidade** - Assegura-se um certo grau de precisão para quantidades estimadas;
- **Custo** - Busca-se minimizar os custos do investimento na aquisição de dados.

Durante a operação, níveis de redundância inferiores à redundância de projeto são atingidos, refletindo a perda de medidas causada por: desligamentos, falha dos canais de comunicação ou eliminação de erros grosseiros. Até certo nível de redução da redundância, um bom plano de medição preserva os requisitos de observabilidade, confiabilidade e qualidade anteriormente mencionados. Entretanto, devido à tendência atual de redução de investimentos, níveis de deterioração da redundância têm sido mais freqüentemente alcançados. Tais níveis, descritos a seguir, correspondem à violação dos requisitos de projeto da redundância, acarretando problemas de natureza cumulativa, principalmente para estimadores estáticos de estado.

1º Nível de deterioração

Este nível é caracterizado pela perda de qualidade do estado/medidas estimadas. Os requisitos de observabilidade e confiabilidade são preservados.

2º Nível de deterioração

A presença de conjuntos críticos apenas (nenhuma medida crítica) indica ingresso no 2º nível de deterioração da redundância. Um conjunto crítico é definido como aquele formado por um grupo de medidas não críticas em que a eliminação de qualquer uma destas torna críticas as remanescentes do conjunto. Neste nível, a confiabilidade da EE é parcialmente comprometida. Medidas pertencentes a conjuntos críticos (também denominados grupos de erros grosseiros ou conjuntos minimamente dependentes) apresentam resíduos normalizados idênticos e coeficientes de correlação unitários [9,10]. Isto significa que um erro grosseiro em uma destas medidas é detectável mas não identificável pela análise de resíduos.

3º Nível de deterioração

A redução da redundância até este nível compromete significativamente a confiabilidade da EE. Também, a perda de observabilidade torna-se iminente, indicada pela presença de medidas críticas. Uma medida é chamada de crítica se a ausência da mesma do conjunto de medidas disponíveis tornar o sistema não observável. Os resíduos da estimação (e respectivos desvios) de medidas críticas são nulos [8,11]. Assim, erros em medidas críticas não podem ser detectados e identificados pela análise de resíduos; mesmo que pudessem, a dificuldade de supressão de tais medidas ainda persistiria, pois a observabilidade seria perdida.

4.0 - OBSERVABILIDADE

Usualmente, a análise de observabilidade é realizada levando-se em conta o desacoplamento entre os conjuntos de grandezas P- θ (potência ativa - ângulo) e Q-V (potência reativa - magnitude das tensões) [12]. Por limitação de espaço, apenas a parte ativa da referida análise será apresentada, sendo a reativa bastante semelhante.

Como o que se deseja verificar é a interdependência de natureza estrutural entre as componentes do vetor de estado e de medidas (observabilidade topológica), as simplificações a seguir serão adotadas.

$R = \mathcal{I}$ (matriz identidade);

$b_{ik} = 1$ (parâmetro do elemento que liga as barras i e k da rede);

Elementos de H :

- linha λ correspondente a medida de fluxo P_{ik} ,
 $H(\lambda, i) = b_{ik}$ $H(\lambda, k) = -b_{ik}$
- linha λ correspondente a medida de injeção P_i ,
 $H(\lambda, i) = \sum_k b_{ik}, i \neq k$ $H(\lambda, k) = -b_{ik}$

sendo k = índices das barras ligadas à barra i .

- as colunas de H são correspondentes aos ângulos das barras; a referência angular não pertence à matriz.

Diz-se que um sistema é observável se a matriz ganho

$G = H^t H$ for inversível, o que pode ser verificado durante sua fatoração pela ausência de pivôs nulos.

5.0 - PERDA IMINENTE DE OBSERVABILIDADE

A identificação de medidas e conjuntos críticos permite que se avalie melhor as condições de observabilidade de um sistema sob supervisão. Em vez de simplesmente se verificar se um sistema é observável ou não, podem-se estabelecer diferentes graus de observabilidade, associados ao nível de criticalidade das medidas processadas. Esta informação será também de crucial importância para as rotinas de processamento de erros grosseiros.

5.1 - Medidas Críticas

Uma medida crítica não tem redundância e portanto apresenta resíduo e respectivo desvio nulos. Numericamente, identifica-se uma medida i como crítica por:

$$r(i) = z(i) - \hat{z}(i) = 0 \quad (7)$$

$$\sigma_E(i) = \sqrt{E(i, i)} = 0 \quad (8)$$

$$E = \mathcal{I} - H(H^t H)^{-1} H^t \quad (9)$$

Na verdade, não apenas o elemento $E(i, i)$ é nulo mas toda a linha i da referida matriz, já que, por ser crítica, a medida i não se correlaciona a nenhuma outra medida do sistema.

5.2 - Conjuntos Críticos

Medidas pertencentes a conjuntos críticos apresentam resíduos normalizados ($r_N(i)$) idênticos, em valor absoluto, e coeficientes de correlação (γ) unitários. Suponha que as medidas i e j pertençam a um conjunto crítico. Assim, as seguintes relações se verificam [9]:

$$\rho_{ij} = \frac{r_N(i)}{r_N(j)} = 1 \quad (10)$$

$$\gamma_{ij} = \frac{E(i, j)^2}{E(i, i)E(j, j)} = 1 \quad (11)$$

5.3 - Algoritmo Proposto

Para a busca numérica por medidas e conjuntos críticos é necessário se calcular resíduos da estimação nas equações (7) e (10). Entretanto, seja qual for o valor das grandezas medidas, para uma medida crítica $z(i)$ qualquer, o resíduo a ela associado será sempre nulo. Da mesma forma, sejam quais forem os valores de medidas $\{z(i), z(j)\}$ pertencentes a um conjunto crítico qualquer, sempre ocorrerá a relação $\rho_{ij} = 1$. Assim sendo, pode-se simplificar o algoritmo de busca adotando-se arbitrariamente $z = I$ (vetor unitário), i.e., todas as medidas são iguais à unidade. Desta forma, o cálculo de resíduos se resume a:

$$z = I \Rightarrow \hat{x} = G^{-1}H^t z \Rightarrow \hat{z} = H\hat{x} \Rightarrow r = z - \hat{z} \Rightarrow \\ \Rightarrow r = z - H(H^t H)^{-1} H^t z \Rightarrow r = [I - H(H^t H)^{-1} H^t] z = Ez = EI$$

$$r(i) = \sum_{k=1}^m E(i, k) \quad (12)$$

$$r_N(i) = \frac{\left| \sum_{k=1}^m E(i, k) \right|}{\sqrt{E(i, i)}} \quad (13)$$

Etapa 1: Identificação de medidas críticas

Para cada medida i , calcular $r(i)$ usando as equações (9) e (12). Se $r(i)$ e $E(i, i)$ forem nulos, então a medida i é crítica.

Etapa 2: Formação de possíveis conjuntos críticos

Para cada medida não crítica i , calcular o correspondente resíduo normalizado $r_N(i)$, através da eq. (13).

Ordenar o vetor r_N . Percorrer sequencialmente r_N , formando conjuntos que apresentem resíduos normalizados iguais, $\rho_{ij} = 1$, calculado usando a eq. (10).

Etapa 3: Identificação de conjuntos críticos

Os elementos dos conjuntos formados na Etapa 2 são confirmados, através da relação estabelecida pela eq. (11). As medidas que não apresentarem coeficiente de correlação γ unitário serão eliminadas do grupo. Os conjuntos cujos elementos foram confirmados são identificados como *conjuntos críticos*.

Comentário: Uma característica importante do algoritmo proposto é que este pode ser construído sem se dispor de um estimador de estado instalado em um Centro de Operação de Sistemas (depende apenas da formação de H e de operações matriciais com a mesma). Isto é extremamente vantajoso, principalmente para sistemas de medição que estejam em fase de projeto ou sendo revistos de forma a oferecer uma melhor cobertura da rede supervisionada, ou ainda, ampliados para atingir expansões da mesma.

6.0 - RESULTADOS NUMÉRICOS

Inicialmente, apresenta-se um exemplo didático de aplicação da metodologia proposta a um sistema-teste de 4 barras, representado na Figura 1.

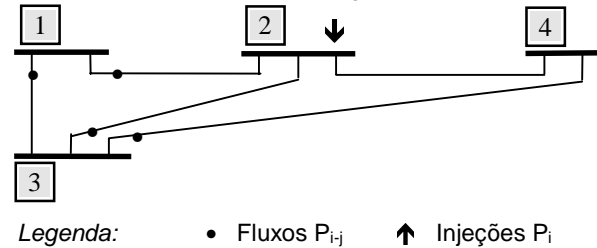


Figura 1 - Sistema-teste para o exemplo didático

Teste 1 – Sistema de 4 barras intacto

A seguir, as seguintes matrizes/vetores necessários à Etapa 1 do algoritmo proposto, são apresentados: matriz Jacobiano H , relacionando medidas e variáveis de estado; matriz de covariância dos resíduos da estimação E (simétrica); vetor de resíduos r ; vetor de resíduos normalizados.

$$H = \begin{matrix} & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 \\ P_{1-2} & -1 & 0 & 0 \\ P_{1-3} & 0 & -1 & 0 \\ P_{3-2} & -1 & 1 & 0 \\ P_{3-4} & 0 & 1 & -1 \\ P_2 & 3 & -1 & -1 \end{matrix}$$

$$E = \begin{matrix} 0,60 & -0,40 & 0 & -0,20 & 0,20 \\ & 0,35 & 0,25 & 0,05 & -0,05 \\ & & 0,75 & -0,25 & 0,25 \\ & & & 0,15 & -0,15 \\ & & & & 0,15 \end{matrix}$$

$$r = \begin{matrix} 0,2 \\ 0,2 \\ 1 \\ -0,4 \\ 0,4 \end{matrix} \quad r_N = \begin{matrix} 0,2582 \\ 0,3381 \\ 1,1547 \\ 1,0328 \\ 1,0328 \end{matrix}$$

De acordo com a Etapa 1, como não há resíduos nulos, conclui-se que nenhuma medida é crítica. Passa-se então à Etapa 2 e, de posse do vetor de resíduos normalizados ordenados, os coeficientes ρ são calculados. Pares de medidas que apresentarem tais coeficientes unitários pertencerão a possíveis conjuntos críticos a serem identificados na etapa seguinte do algoritmo.

r_N (ordenado) =	med1 (P_{3-2})	1,1547
	med2 (P_{3-4})	1,0328
	med3 (P_2)	1,0328
	med4 (P_{1-3})	0,3381
	med5 (P_{1-2})	0,2582

$\rho_{med1med2}$	$\rho_{med2med3}$	$\rho_{med2med4}$	$\rho_{med4med5}$
0,9682	1	0,3274	0,7637

Assim, as medidas de número 2 e 3 no vetor r_N ordenado, formam um possível conjunto crítico: $C1=\{P_{3-4}, P_2\}$. Na Etapa 3, calculando-se o coeficiente γ , correspondente ao único par crítico de medidas identificado, verifica-se que o mesmo é unitário e, portanto, confirma-se que o conjunto $CC1=C1=\{P_{3-4}, P_2\}$ é de fato crítico. Tal ocorrência revela uma fraca condição para a observabilidade do sistema.

A seguir, de modo a ilustrar as modificações que sofrem as condições de observabilidade frente a perda de medição ou alterações topológicas, mais dois testes serão apresentados com o sistema da Figura 1.

Teste 2 – Sistema de 4 barras sem a medida P_{3-4}

Suponha agora que a medida P_{3-4} esteja indisponível. A seguir, a matriz E e os vetores de resíduos da estimação correspondentes à referida modificação são apresentados:

$$E = \begin{matrix} P_{1-2} & 1/3 & & & \\ P_{1-3} & -1/3 & 1/3 & & \\ P_{3-2} & -1/3 & 1/3 & 1/3 & \\ P_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

$$r = \begin{matrix} -1/3 \\ 1/3 \\ 1/3 \\ 0 \end{matrix} \quad r_N = \begin{matrix} \sqrt{3}/3 \\ \sqrt{3}/3 \\ \sqrt{3}/3 \\ * \end{matrix}$$

A perda de P_{3-4} acarretou o aparecimento da medida crítica P_2 , evidenciado pelo resíduo e linha da matriz E correspondentes nulos. Isto era esperado, já que as medidas P_{3-4} e P_2 formavam um conjunto crítico. Desta forma, a observabilidade do sistema está ameaçada pois se P_2 for perdida o sistema se tornará não observável. Além disso, novo conjunto crítico é identificado através dos coeficientes ρ e γ unitários: $CC1=\{P_{1-2}, P_{1-3}, P_{3-2}\}$.

Teste 3 – Sistema de 4 barras sem a ligação 2-4

Admita que todas as medidas estejam disponíveis mas a ligação entre as barras 2 e 4 tenha saído de serviço. Esta alteração topológica também irá afetar a condição de observabilidade do sistema, como se pode constatar pelos cálculos a seguir.

$$H = \begin{matrix} & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 \\ P_{1-2} & -1 & 0 & 0 \\ P_{1-3} & 0 & -1 & 0 \\ P_{3-2} & -1 & 1 & 0 \\ P_{3-4} & 0 & 1 & -1 \\ P_2 & 2 & -1 & 0 \end{matrix}$$

$$E = \begin{matrix} 2/3 & -1/3 & 0 & 0 & 1/3 \\ -1/3 & 1/3 & 1/3 & 0 & 0 \\ 0 & 1/3 & 2/3 & 0 & 1/3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/3 & 0 & 1/3 & 0 & 1/3 \end{matrix}$$

$$r = \begin{matrix} 2/3 \\ 1/3 \\ 4/3 \\ 0 \\ 1 \end{matrix} \quad r_N = \begin{matrix} 0,8165 \\ 0,5774 \\ 1,6330 \\ * \\ 1,7321 \end{matrix}$$

r_N (ordenado) =	med1 (P_2)	1,7321
	med2 (P_{3-2})	1,6330
	med3 (P_{1-2})	0,8165
	med4 (P_{1-3})	0,5774
	med5 (P_{3-4})	*

$\rho_{med1med2}$	$\rho_{med2med3}$	$\rho_{med3med4}$	$\rho_{med4med5}$
0,9428	0,5000	0,7072	*

Neste caso, a medida P_{3-4} tornou-se crítica, pondo em risco a observabilidade do sistema, mas nenhum conjunto crítico foi identificado.

A metodologia proposta foi também testada com o sistema-teste IEEE-14 barras mostrado na Figura 2.

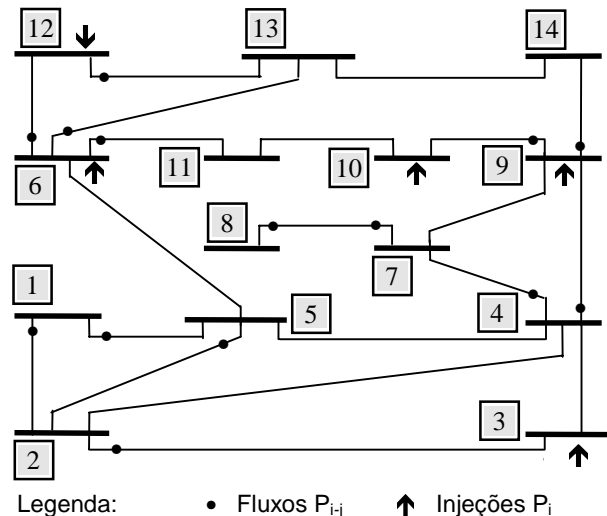


Figura 2: Sistema de medição para a supervisão do sistema IEEE-14 barras

Teste 4 – Sistema IEEE-14 barras intacto

De acordo com a Etapa 1 do algoritmo proposto, não há medidas críticas no sistema representado na Fig. 2. Na Etapa 2, os seguintes possíveis conjuntos críticos são formados:

- C1: $\{P_{7-8}, P_{8-7}\}$
- C2: $\{P_{4-7}, P_{9-14}, P_9\}$
- C3: $\{P_{1-2}, P_{1-5}, P_{12}\}$
- C4: $\{P_{2-3}, P_{6-11}, P_{6-13}, P_3, P_6, P_{10}\}$

Na Etapa 3, as medidas P_{12} e P_{6-13} não apresentam coeficientes γ unitários nos conjuntos C3 e C4, respectivamente. Assim, são confirmados como críticos os seguintes conjuntos:

CC1: $\{P_{7-8}, P_{8-7}\}$
 CC2: $\{P_{4-7}, P_{9-14}, P_9\}$
 CC3: $\{P_{1-2}, P_{1-5}\}$
 CC4: $\{P_{2-3}, P_{6-11}, P_3, P_6, P_{10}\}$

Teste 5 – Sistema IEEE-14 barras sem a medida P_3

Considere que a medida P_3 esteja indisponível. A Etapa 1 identifica P_{2-3} , P_{6-11} , P_6 e P_{10} como medidas críticas. Este resultado era esperado já que P_3 pertencia a CC4, e conseqüentemente sua ausência leva as demais medidas do conjunto a se tornarem críticas. Na Etapa 2, os seguintes conjuntos são formados:

C1: $\{P_{7-8}, P_{8-7}\}$
 C2: $\{P_{4-7}, P_{4-9}, P_{9-10}, P_{9-14}, P_9\}$
 C3: $\{P_{1-2}, P_{1-5}, P_{5-2}, P_{6-13}, P_{12}\}$

Na Etapa 3, P_{6-13} e P_{12} não são confirmadas como pertencentes ao conjunto crítico CC3:

CC1: $\{P_{7-8}, P_{8-7}\}$
 CC2: $\{P_{4-7}, P_{4-9}, P_{9-10}, P_{9-14}, P_9\}$
 CC3: $\{P_{1-2}, P_{1-5}, P_{5-2}\}$

Teste 6 – Sistema IEEE-14 barras sem a ligação 2-5

Admita agora que todas as medidas estejam disponíveis, mas que tenha ocorrido a abertura da ligação entre as barras 2 e 5, acarretando a perda da medida P_{5-2} . A Etapa 1 do algoritmo proposto não aponta nenhuma medida como crítica, tal como ocorre para a configuração do Teste 4. Na Etapa 2, os seguintes conjuntos possivelmente críticos são formados:

C1: $\{P_{7-8}, P_{8-7}\}$
 C2: $\{P_{4-7}, P_{9-14}, P_9\}$
 C3: $\{P_{1-2}, P_{1-5}, P_{2-3}, P_{6-11}, P_3, P_6, P_{10}\}$

Na Etapa 3, nenhuma medida de tais conjuntos é excluída, portanto:

CC1 \equiv C1
 CC2 \equiv C2
 CC3 \equiv C3

Note que neste caso, os conjuntos CC3 e CC4 identificados no Teste 4 se unem em um só conjunto com 7 elementos (CC3).

7.0 - CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou o problema da perda iminente de observabilidade de uma rede supervisionada pela função Estimacão de Estado em Centros de Operacão de sistemas de potência. As condições de observabilidade foram verificadas através da identificacão de medidas e conjuntos críticos. Esta identificacão também é de fundamental importãncia para o processamento de medidas portadoras de erros grosseiros. Para tal, um algoritmo numérico, simples, de fácil implementacão, independente do estimador instalado, é proposto e testado de forma a evidenciar sua eficiêcia computacional e confiabilidade.

8.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro recebido do CNPq, CAPES, Faperj e Finep/Recope/Projeto 0626-96-SAGE para a realizacão deste projeto de pesquisa.

9.0 - REFERÊNCIAS

- [1] L. Jamniczky, *EMS network security applications of the future*, IEEE Computer Applications in Power, Apr./1996.
- [2] M. B. Do Coutto Filho, A. M. Leite da Silva, D. M. Falcão, *Bibliography on power system state estimation (1968-1989)*, IEEE Trans. on PS, Vol.5, pp. 950-961, Aug./1990.
- [3] O. Alsaç, N. Vempati, B. Stott, A. Monticelli, *Generalized state estimation*, IEEE Trans. on PS, Vol. 13, pp. 1069-1075, Aug./1998.
- [4] M. B. Do Coutto Filho, J. Duncan Glover, A. M. Leite da Silva, *State estimators with forecasting capability*, 11th Power Systems Computation Conf. Proc., Vol.II, pp.689-695, France, Aug./1993.
- [5] F.F. Wu, *Power system state estimation: a survey*, Electrical Power & Energy Systems, Vol. 12, pp. 80-87, Jan./1990.
- [6] A. Gómez Expósito, A. Abur, *Generalized observability analysis and measurement classification*, Proc. PICA'97, pp. 97-102, May/1997.
- [7] M.B. Do Coutto Filho, J.C.S. Souza, R.S.G. Matos, M.Th. Schilling, *Strategies for preserving data redundancy in power system state estimation*, 13th Power Systems Computation Conference Proc., Trodhein, Norway, Jul./1999.
- [8] A. Simões-Costa, T. S. Piazza, A. Mandel, *Qualitative methods to solve qualitative problems in power system state estimation*, IEEE Trans. on PS, Vol. 5, pp. 941-949, Aug./1990.
- [9] M. Ayres, P. H. Haley, *Bad data groups in power system state estimation*, IEEE Trans. PS, Vol. PWRS-1, pp.1-9, Aug./1986.
- [10] G.N.Korres, G.C. Contaxis, *Identification of minimally dependent sets of measurements in state estimation*, IEEE Trans. on PS, Vol.6, pp. 999-1005, Aug./1991.
- [11] K. A. Clements, G. R. Krumpholz, P. Davis, *Power system state estimation residual analysis: an algorithm using network topology*, IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-100, pp. 1779-1787, Apr./1981.
- [12] K.A. Clements, G.R. Krumpholz, P.W. Davis, *Power system state estimation with measurement deficiency: an observability/measurement placement algorithm*, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-102, pp. 2012-2020, Jul./1983.