

AValiação de Dados Críticos de Baixa Cardinalidade em Redes de Energia

ANDRE A. AUGUSTO¹, JULIO C. STACCHINI DE SOUZA^{1,2}, M. B. DO COUTTO FILHO²

¹Depto. de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Fluminense

²Instituto de Computação, Universidade Federal Fluminense

Rua Passo da Pátria, 156 – Bloco D, sala 404

Caixa Postal 24210-240, Niterói, RJ, BRASIL

E-mails: aaaugusto@id.uff.br, julio@ic.uff.br, mbrown@ic.uff.br

Abstract— The measurement redundancy is an important aspect of the state estimation process. During real-time operation of electrical networks, the redundancy level may suffer variations due to: communication channel losses, spurious data rejection, unavailability of measuring devices, network configurations modifications, etc. The occurrence of these events might result in deficiency of state observation capacity (observability and bad data processing) of state estimation tool. This paper presents a methodology of identification of critical groups of at most 3 elements (critical k-tuples) of a meter plan. These groups characterize situations in which the loss of network observability and the bad data processing capacity by state estimation are imminent. A potential application of this methodology is illustrated by numerical results obtained for the IEEE 24 bus test system.

Keywords— Power system measurements, State Estimation, Observability, Redundancy, Power System.

Resumo— A redundância das medidas é um importante aspecto do processo de estimação de estado. Ao longo da operação em tempo real, o nível de redundância pode sofrer variações devido a: perda de canais de comunicação; rejeição das medidas espúrias; indisponibilidade de dispositivos de medição; alterações na configuração da rede, etc. A ocorrência de tais eventos pode resultar na perda de capacidade de observação do estado (observabilidade e depuração de erros grosseiros) por parte da ferramenta estimação de estado. Este artigo apresenta uma metodologia de identificação de grupos críticos até 3 elementos (k-tuplas críticas) pertencentes a um determinado conjunto de medição. Tais grupos caracterizam situações iminentes de perda da observabilidade da rede elétrica e da capacidade da estimação de estado em detectar e de identificar dados espúrios. Uma aplicação potencial da metodologia proposta é ilustrada pelos resultados numéricos obtidos para o sistema teste IEEE 24 barras.

Palavras-chave— Medidas de Sistema de Potência, Estimação de Estado, Observabilidade, Redundância, Sistema de Potência.

1 Introdução

Sistemas de Gerenciamento de Energia (SGEs) incluem funções de monitoramento, controle, e otimização de rede elétricas, implementadas através de aplicações computacionais avançadas. Dentre estas, a Estimação de Estado (EE) dedica-se principalmente a atenuar os erros de medição de pequena magnitude (ordinários, inerente ao processo de medição e aquisição de dados) e eliminar erros grosseiros (EGs) introduzidos pelo funcionamento inadequado do sistema de aquisição de dados (Monticelli, 1999). Usualmente, as medições por tais sistemas obtidas são: magnitude das tensões das barras; fluxos e injeções de potência ativa / reativa. Atualmente, são também disponibilizados pelos sistemas de medição os sincrofases (magnitudes e ângulos de fase) das tensões das barras e das correntes (Phadke, 2008).

O nível de redundância dos dados fornecidos a EE tem notória influência no desempenho da ferramenta. Por redundância entende-se o excesso de medidas em relação àquele mínimo necessário para a determinação do estado da rede elétrica em sua totalidade. Não somente a quantidade de medidas disponíveis caracteriza a redundância, mas também a localização e tipo destas. Para um processo bem-sucedido de estimação de estado, os dados supridos devem apresentar redundância suficiente para atender a requisitos tais como: *observabilidade* – permitir a su-

pervisão da rede elétrica como um todo; *confiabilidade* – tornar possível a detecção, identificação, e substituição de dados espúrios; *qualidade* – assegurar uma determinada precisão das quantidades estimadas; *robustez* – garantir que os requisitos anteriores sejam cumpridos, em caso de indisponibilidade de medições ou alterações na configuração da rede.

Ao longo da operação em tempo real, a EE pode experimentar deficiência de medidas, fruto de alterações na configuração da rede, falhas no sistema de aquisição de dados ou eliminação de EGs. Nos casos em que a carência de dados é severa, a EE funciona inadequadamente, devido a incapacidade do processo de estimação de atenuar a incerteza das medidas. Tais situações críticas de redundância dos dados estão associadas às k-tuplas críticas (Ck-tuplas) do sistema de medição. Entende-se uma Ck-tupla como o grupo de k medidas de um plano de medição cuja indisponibilidade simultânea de todas torna a rede não observável, mas a indisponibilidade de j destas k medidas não acarreta perda da observabilidade (Clements, 1986). A concepção de Ck-tupla generaliza o conceito de medida crítica (C1-tupla) e de pares críticos de medidas (C2-tuplas), que têm recebido atenção em diversos trabalhos sobre a análise de observabilidade e de criticalidade devido sua conexão com problemas de detecção e identificação de EGs (Do Coutto Filho, 2007), (Clements, 1986), (Korres, 1991). As Ck-tuplas são de particular interesse na análise de segurança cibernética de redes de energia, em que a vulnerabilidade do sistema de aquisição de dados é ava-

liada tendo-se em vista a possibilidade injeção de dados maliciosos (Liu, 2009) e (Kosut, 2010) que causam EGs intencionais e não detectáveis em certos grupos de medidas, correspondentes às Ck-tuplas (Sou, 2012). O conhecimento das tuplas críticas de um sistema de medição pode também ser utilizado para aferir a força de um sistema de medição (Crainic, 1990).

Por ser intrinsecamente combinatória, a identificação de Ck-tuplas, em especial aquelas de cardinalidade elevada, é um problema de difícil solução. As diferentes técnicas de identificação de k-tuplas críticas, são em geral, voltadas a identificação de C1- e C2-tuplas, sendo agrupadas em duas abordagens: topológica e numérica. A abordagem topológica (Clements, 1983), (Simões Costa, 1990) e (Korres, 1991) é baseada na teoria dos grafos, enquanto a numérica envolve manipulações (usualmente em ponto flutuante) das matrizes Jacobiana, Gram, ou de Ganho (Do Coutto Filho, 2007), (London, 2007), e (de Almeida, 2009).

Este artigo trata do problema de enumerar Ck-tuplas de cardinalidade até três ($k \leq 3$) em um sistema de medição. A identificação destes grupos críticos permite localizar áreas em que a EE é vulnerável à indisponibilidade de uma ou mais medidas. O procedimento apresentado baseia-se em propriedades estatísticas dos resíduos normalizados computados durante o processo de estimação e características inerentes às Ck-tuplas. Os resultados numéricos obtidos com o sistema-teste IEEE 24 Barras ilustram a aplicação da metodologia proposta.

2 Fundamentos de Estimação de Estado

Os principais aspectos da EE podem ser encontrados em (Montecelli, 1999) e (Abur, 2004), sendo nesta seção apresentados apenas aqueles necessários à proposição da metodologia.

Habitualmente, o processo de estimação de estado compreende quatro etapas, a saber: configuração de rede, análise de observabilidade, filtragem e análise de resíduos. Na etapa de configuração da rede obtém-se o modelo barra-ramo utilizado pela EE. A análise de observabilidade verifica se as medidas atualmente disponíveis permitem a determinação do estado da rede elétrica como um todo. Na etapa de filtragem, determinam-se a estimativa do estado da rede e das medidas, em geral através do critério dos mínimos quadrados ponderados (MQP). A análise residual verifica a consistência dos resultados obtidos pela EE sendo os EGs (se presentes) detectados, identificados e eliminados.

2.1 Estimação de Estado Linear

O problema de identificação de Ck-tuplas é de natureza estrutural, tal como o problema de análise de observabilidade (Do Coutto Filho, 2007). Pode-se

empregar para as medidas adquiridas, portanto, o seguinte modelo linearizado (acoplamento potência ativa-ângulo):

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (1)$$

onde: $\mathbf{z}$ – vetor de medidas ativa ($m \times 1$), m – número de medidas ativas; $\mathbf{x}$ – vetor ângulo de fase da tensão das barras ($n \times 1$); n – número de ângulos de fase (variáveis de estado a serem determinadas); $\boldsymbol{\varepsilon}$ – vetor de erro das medidas ativas ($m \times 1$); $\mathbf{H}$ – matriz Jacobiana ($m \times n$) das medições.

A linha ℓ da matriz Jacobiana é construída da seguinte forma:

- Fluxo de potência P_{j-k} ou corrente de ramo I_{j-k} :

$$\mathbf{H}(\ell, j) = b_{jk} \quad \mathbf{H}(\ell, k) = -b_{jk} \quad (2)$$

- Injeção de potência P_j ou de corrente real I_j :

$$\mathbf{H}(\ell, j) = \sum_k b_{jk} \quad \mathbf{H}(\ell, k) = -b_{jk} \quad (3)$$

- Ângulo de fase da tensão θ_k :

$$\mathbf{H}(\ell, \ell) = 1 \quad (4)$$

onde: b_{jk} é suscetância do ramo que conecta a barra j a barra k . Para fins de análise de observabilidade e criticalidade, pode-se assumir $b_{jk} = 1$.

O estimador MQP minimiza a seguinte função objetivo:

$$J(\hat{\mathbf{x}}) = [\mathbf{z} - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}] \quad (5)$$

O estado estimado $\hat{\mathbf{x}}$ que minimiza (5) é dado por:

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{G}^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{z} \quad (6)$$

onde: $\mathbf{R}$ é a matriz de covariância das medidas e a matriz $\mathbf{G} = \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}$ é denominada matriz de ganho. $\mathbf{G}$ é esparsa, simétrica e positiva semi-definida, sendo positiva definida somente se a rede é observável (Abur, 2004).

2.2 Análise Residual

Nesta etapa, o vetor de resíduos $\mathbf{r}$, definido como a diferença entre o vetor de medidas adquiridas $\mathbf{z}$ e o de medidas estimadas $\hat{\mathbf{z}}$, é normalizado e submetido ao teste de validação (Teste dos resíduos normalizados):

$$\mathbf{r} = \mathbf{z} - \hat{\mathbf{z}} = \mathbf{z} - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}} \quad (7)$$

$$\mathbf{r}_N(i) = |\mathbf{r}(i)| / \sigma_E(i) \leq \lambda \quad (8)$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{I} - \mathbf{H}\mathbf{G}^{-1} \mathbf{H}^T \quad (9)$$

onde: $\hat{\mathbf{x}}$ é obtido a partir de (6); $\sigma_e(i) = \sqrt{\mathbf{E}(i,i)}$ é o desvio padrão do i -ésimo resíduo; $\mathbf{E}(i,i)$ o elemento da i -ésima linha/coluna da matriz de covariância dos resíduos $\mathbf{E}$; $\mathbf{I}$ é a matriz identidade; e $\mathbf{r}_N(i)$ é o resíduo normalizado da i -ésima medida.

A violação do limiar de detecção λ leva a suspeição de presença de EGs. Os resíduos normalizados e os elementos da matriz de covariância dos resíduos associados possuem propriedades estatísticas úteis à identificação das Ck-tuplas de baixa cardinalidade, conforme será visto na próxima seção.

3 Metodologia Proposta

A análise de criticalidade tem por finalidade reconhecer situações em que a rotina de validação dos dados não é confiável ou a indisponibilidade de medidas acarreta a não observabilidade da rede. As situações cobertas por tal análise estão geralmente associadas à presença, medição de medidas críticas e pares críticos de medidas (C1- e C2-tuplas) em um sistema de, sendo a identificação destes grupos críticos um aspecto importante da avaliação da criticalidade.

A ocorrência de trios críticos revela cenários em que há risco iminente de perda de capacidade de identificação de EGs, o que torna sua determinação um problema relevante à análise de criticalidade. Apresentar-se-á nesta seção procedimento proposto para identificação destas criticalidades. As propriedades estatísticas dos resíduos de estimação serão exploradas e aplicadas em um procedimento simples de identificação de grupos críticos com até 3 medidas que pode empregar rotinas convencionais de análise de criticalidade de maneira acessória, sendo aplicável, portanto, em qualquer ferramenta existente de EE.

3.1 Medidas críticas ou C1-tuplas

Medidas críticas (Cmeds) são aquelas indispensáveis ao processo de estimação e cuja remoção torna a rede não observável. Conforme demonstrado em (Clements, 1986) e (Do Coutto Filho, 2007), o resíduo de uma Cmed é nulo, sendo este não correlacionado com aquele de nenhuma outra medida. Portanto, o resíduo de uma C1-tupla satisfaz as relações:

$$\mathbf{r}(i) = \mathbf{z}(i) - \hat{\mathbf{z}}(i) = 0 \quad (10)$$

$$\mathbf{E}(i,:) = 0 \quad (11)$$

onde: $\mathbf{E}(i,:)$ é a i -ésima linha da matriz $\mathbf{E}$ associada com a medida $\mathbf{z}(i)$.

As expressões (10) e (11) evidenciam que a etapa de filtragem não é efetiva para as C1-tuplas, não sen-

do possível sequer detectar a presença de EGs em tais medidas durante a etapa validação dos dados. A existência de Cmeds em um plano de medição caracteriza níveis severos deficiência de medidas em que a não observabilidade da rede elétrica é iminente e a capacidade de detecção e identificação de EGs é seriamente comprometida.

3.2 Pares críticos de medidas ou C2-tuplas

Um conjunto crítico (Cconj), também denominado conjunto minimamente dependente (Clements, 1986) e (Korres, 1991), é definido como o grupo de medidas cuja indisponibilidade de qualquer dos elementos torna os outros Cmeds. Nota-se para qualquer par de medidas em um Cconj que a perda de uma medida não torna a rede inobservável, mas a indisponibilidade simultânea do par sim, o que permite concluir, a partir do conceito de Ck-tupla apresentado na Seção 1, que os pares de medidas em Cconj encaixam-se no conceito de C2-tuplas.

Desta forma, as propriedades estatísticas dos resíduos dos C2-tuplas são aquelas dos pares de medidas em Cconjs. Tendo-se isto em vista, pode-se seguramente afirmar que os resíduos das medidas de um C2-par são 100% correlacionados, sendo válidas para qualquer C2-par de medidas $(\mathbf{z}(j), \mathbf{z}(k))$ as seguintes relações (Clements, 1986) e (Do Coutto Filho, 2007):

$$\frac{\mathbf{r}_N(j)}{\mathbf{r}_N(k)} = 1 \quad (12)$$

$$\frac{\mathbf{E}(j,k)}{\sqrt{\mathbf{E}(j,j)\mathbf{E}(k,k)}} = 1 \quad (13)$$

Depreende-se das expressões (12) e (13) que, caso um EG contamine uma medida participante de uma C2-tupla, o par de medidas apresentará resíduos normalizados iguais e elevados (isto é, superiores ao limiar de detecção em (8)). A detecção de erro grosseiro é possível, mas não a sua correta identificação. A presença de C2-tuplas em um plano de medição sinaliza a incapacidade de identificação EGs por parte da EE, e a iminência da perda de capacidade de detecção.

3.3 C3-tuplas

Até o presente momento, não são conhecidas relações numéricas para resíduos de trios críticos de medidas, o que dificulta a sua identificação. Todavia, pode-se empregar na determinação de tais grupos as relações (10) - (13) ou as rotinas de análise de criticalidade destinadas a identificação de Cmeds e Cconjs.

Segundo (Abur, 2004), uma Ck-tupla não pode conter outra Cj-tupla ($j < k$). Portanto, a remoção de

($k-j$) medidas de um C_k -tupla, deve obrigatoriamente reduzir a sua cardinalidade para j . Tal fato é constatável em todas as C_2 -tuplas de um C_{conj} . Tendo-se isto por base, a remoção de 1 elemento de uma C_3 -tupla (repare que neste caso $k=3$ e $j=2$) fará com que as medidas restantes formem uma C_2 -tupla. Portanto, se uma medida redundante (isto é, não participante de nenhuma C_1 - ou C_2 -tupla) torna-se indisponível e novos pares críticos (e consequentemente, novos conjuntos críticos) surgem, cada nova C_2 -tupla, juntamente com a medida removida, constitui uma C_3 -tupla.

Nota-se, portanto, que a presença de C_3 -tuplas no plano de medição representa vulnerabilidade da rotina de validação dos dados à perda de uma medida e que a contaminação por EGs de duas medidas em um trio crítico é não identificável.

3.4 Algoritmo proposto

A partir do anteriormente exposto, é possível obter inteligentemente as C_3 -tuplas de um conjunto de medição verificando-se o aparecimento de novos pares de medidas quando uma das medidas é temporariamente removida do plano de medição.

A seguir um método eficaz e simples para enumeração k -tuplas críticas de cardinalidade até 3 será apresentado. O método consiste em determinar primeiramente as medidas que participam de C_1 - e C_2 -tuplas do plano de medição dado. Isto pode ser realizado empregando-se as propriedades (10) – (13) ou procedimentos de identificação de C_{meds} e C_{conjs} (Clements, 1986), (Simões, 1990), (Korres, 1991), (Do Coutto Filho, 2007), (London, 2007) e (de Almeida, 2009). As medidas redundantes são armazenadas em uma lista de medidas redundantes **Lred**.

Para obter-se as C_3 -tuplas retira-se uma medida redundante da lista **Lred**. Se sua remoção do plano de medidas dá origem a novas C_2 -tuplas, formam-se C_3 -tuplas combinando-se a medida retirada de **Lred** com cada C_2 -tupla criadas. A medida é então reinserida no plano de medição, sendo uma nova medida redundante selecionada de **Lred**, até que todas na lista tenham sido testadas. O algoritmo mostrado no Quadro 1 descreve resumidamente este procedimento.

Note que o algoritmo proposto requer m_r atualizações da lista **Lred**, sendo m_r o total de medidas redundantes encontradas no passo (ii). Assim sendo, o desempenho computacional do algoritmo é afetado principalmente pelo esforço despendido na identificação de C_2 -tuplas. Os esquemas encontrados em (Do Coutto Filho, 2007) e (Korres, 1991) para atualizar de forma eficiente C_{conjs} (sempre que as medições ficam indisponíveis) podem ser adotados para aprimorar o algoritmo proposto.

Algoritmo Proposto	
(i)	Determinar C_{meds} e pares de medidas em C_{conjs} ;
(ii)	Construir lista de medidas redundantes Lred
(iii)	Se Lred estiver vazia, ir para o passo (viii). Ir para o passo (iv) caso contrário;
(iv)	Retirar próxima medida de Lred e torná-la indisponível no plano de medição;
(v)	Atualizar C_{conjs} e identificar novos pares críticos formados;
(vi)	Para cada novo par crítico formado:
	(vi.1) Obter trio crítico combinando-se o novo par crítico com a medida retirada de Lred ;
(vii)	Tornar a medida retirada de Lred novamente disponível, atualizar C_{conjs} e retornar ao passo (iv);
(viii)	Encerrar o algoritmo, retornando as C_{meds} e os pares de medidas em C_{conjs} do passo (i) como C_1 - e C_2 -tuplas, respectivamente, e os trios obtidos no passo (vi.1) como C_3 -tuplas.

Quadro 1 – Algoritmo de identificação de C_k -tuplas ($k < 3$).

Na próxima seção, resultados numéricos obtidos para o sistema teste IEEE de 24 barras ilustrarão a metodologia proposta.

4 Testes e Resultados

Adotou-se neste trabalho o sistema IEEE 24 barras. O procedimento de identificação de C_{meds} e C_{conjs} utilizado encontra-se em (Do Coutto Filho, 2007). O método proposto foi implementado em linguagem MATLAB, sendo os testes realizados em um computador Intel Core-i7, 3.4 GHz, e com 8Gb de RAM.

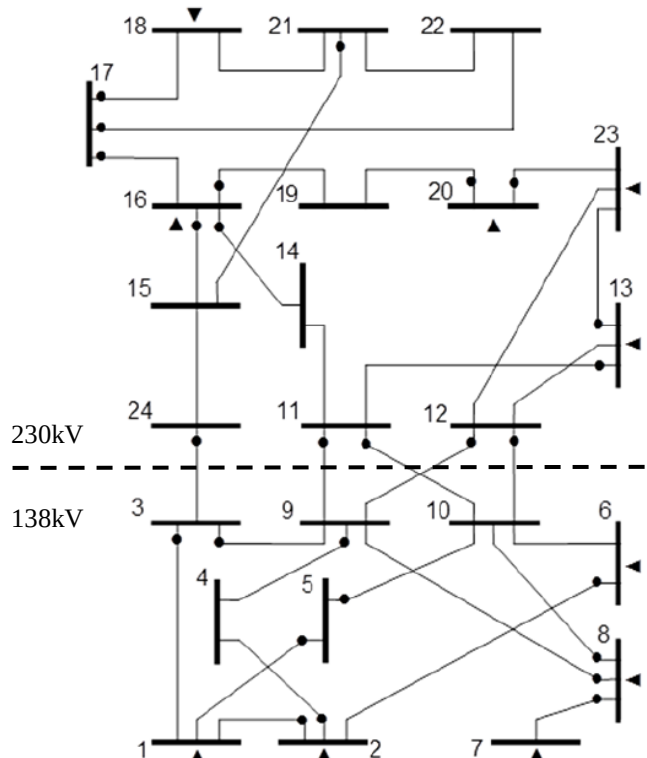
4.1 Teste com o Sistema IEEE 24 Barras

O Sistema IEEE 24 barras, apresentado na Figura 1, consiste de 24 Barras e 34 ramos, separados em dois níveis de tensão, 138kV e 230kV. O plano de medição, apresentado na mesma Figura, é composto de 18 unidades de medição, que mensuram 27 medidas de fluxo de potência e 10 medidas de injeção de potência.

Se fosse utilizada a enumeração exaustiva, um total de 2.324 combinações de medidas seriam avaliadas (isto é, verificada a observabilidade da rede na ausência de cada uma das possíveis combinações) afim de que todos as C_k -tuplas de cardinalidade até 3 fossem determinadas.

Utilizando a metodologia apresentada na última seção, no passo (i) do Algoritmo descrito no Quadro 1 foram identificados 2 medidas críticas e 3 conjuntos críticos, aos quais pertencem 7 medidas do plano de medição. O número de medições redundantes é, portanto, 20. Ao longo da execução do Algoritmo

proposto realizou-se 1 identificação de Cmeds, 1 identificação de Cconjs, 20 remoções de medidas e 20 atualizações de Cconjs.



● Medida de Fluxo de Potência ▲ Medida de injeção de Potência
Figura 1 – Sistema IEEE 24 Barras – Plano de medição adotado

Foram identificadas 2 C1-tuplas, 7 C2-tuplas e 36 C3-tuplas, descritas na Tabela 1. Nota-se que todas as medidas do plano de medição estão envolvidas em Ck-tuplas de baixa cardinalidade (até 3). Apesar do pequeno número de Cmeds ou de medidas em Cconjs, parte considerável das medidas participa de C3-tuplas. Os resultados mostram nitidamente que a perda de qualquer medida leva a incapacidade da EE em processar EGs.

Os locais de maior vulnerabilidade rede sob supervisão são aqueles em que estão as medidas críticas P_{24-3}/P_{17-22} e os conjuntos críticos $Cconj1=\{P_{17-18}, P_{21-15}, P_{18}\}$, $Cconj2=\{P_{16}, P_{16-14}, P_{16-19}\}$ e $Cconj3=\{P_{20}, P_{20-19}\}$. Inspeccionando-se Tabela I, constata-se ainda 17 ocorrências das medidas P_{16-15} e P_{17-16} e 9 das medidas P_{16-14} , P_{16-19} , P_{17-18} , P_{21-15} e P_{18} , sendo grande parte destas em trios críticos.

De modo a aumentar a robustez do plano de medição à perda de uma medida, pode-se eliminar as criticalidades reforçando-se o sistema de medição. Sabe-se da análise de observabilidade e criticalidade que é possível eliminar uma C1-tupla ou C2-tupla colocando-se novas medições nas imediações das medidas que constituem tais tuplas.

Adotando-se o mesmo procedimento para os trios críticos, serão adicionadas ao plano de medidas as medidas P_{15} e P_{22} .

Tabela 1. Ck-tuplas do plano de medição

Cardinalidade	Ck-tuplas
1(Total=2)	$(P_{24-3}), (P_{17-22})$
2(Total=7)	$(P_{17-18}, P_{21-15}), (P_{18}, P_{21-15}), (P_{18}, P_{17-18}), (P_{16-14}, P_{16-19}), (P_{16}, P_{16-19}), (P_{16}, P_{16-14}), (P_{20}, P_{20-19})$
3(Total=36)	$(P_{16-19}, P_{17-16}, P_{21-15}), (P_{16-19}, P_{17-16}, P_{17-18}), (P_{16-15}, P_{17-16}, P_{21-15}), (P_{16-15}, P_{17-16}, P_{17-18}), (P_{16-15}, P_{16-19}, P_{21-15}), (P_{16-15}, P_{16-19}, P_{17-18}), (P_{16-15}, P_{16-19}, P_{17-16}), (P_{16-14}, P_{17-16}, P_{21-15}), (P_{16-14}, P_{17-16}, P_{17-18}), (P_{16-14}, P_{16-15}, P_{21-15}), (P_{16-14}, P_{16-15}, P_{17-18}), (P_{16-14}, P_{16-15}, P_{17-16}), (P_{23}, P_{20-19}, P_{20-23}), (P_{23}, P_{13-11}, P_{13-23}), (P_{20}, P_{23}, P_{20-23}), (P_{18}, P_{16-19}, P_{17-16}), (P_{18}, P_{16-15}, P_{17-16}), (P_{18}, P_{16-15}, P_{16-19}), (P_{18}, P_{16-14}, P_{17-16}), (P_{18}, P_{16-14}, P_{16-15}), (P_{16}, P_{17-16}, P_{21-15}), (P_{16}, P_{17-16}, P_{17-18}), (P_{16}, P_{16-15}, P_{21-15}), (P_{16}, P_{16-15}, P_{17-18}), (P_{16}, P_{16-15}, P_{17-16}), (P_{16}, P_{18}, P_{17-16}), (P_{16}, P_{16-15}, P_{17-16}), (P_{16}, P_{18}, P_{16-15}), (P_{16}, P_{16-15}, P_{17-16}), (P_{13}, P_{13-11}, P_{13-23}), (P_{13}, P_{23}, P_{13-23}), (P_{13}, P_{23}, P_{13-11}), (P_{8}, P_{8-9}, P_{8-10}), (P_{7}, P_{8}, P_{8-7}), (P_{2}, P_{2-4}, P_{9-4}), (P_{2}, P_{6}, P_{6-2}), (P_{1}, P_{5-1}, P_{5-10}), (P_{1}, P_{3-1}, P_{3-9})$

A medida P_{15} está na vizinhança de P_{16-15} e P_{24-3} enquanto P_{22} está na vizinhança de P_{17-16} e P_{17-22} . Os resultados deste reforço são apresentados na Tabela 2. Como pode ser visto a partir desta Tabela, foi possível reduzir o número de C3-tuplas de 36 para 12. Além disso, três pares críticos e todas as medidas críticas também foram eliminados. A título de ilustração, se a informação provida pelas C3-tuplas fosse ignorada, poder-se-ia cogitar instalar a medida P_3 ao invés da P_{15} . Embora o número de Cmeds nos dois casos seja o mesmo, com a inserção da medida P_3 haveriam 7 C2-tuplas e 25 C3-tuplas.

O exemplo apresentado mostra como a determinação das Ck-tuplas de cardinalidade até 3 é muito útil na identificação de vulnerabilidades nos sistemas de medição e na formulação de estratégias para diminuí-la.

Tabela 2. Ck-tuplas após a inserção de das medidas P_{15} e P_{19} .

Cardinalidade	Ck-tuplas
1(Total=0)	---
2(Total=4)	$(P_{22}, P_{17-22}), (P_{18}, P_{17-18}), (P_{15}, P_{24-3}), (P_{16}, P_{16-14})$
3(Total=12)	$(P_{16-19}, P_{17-16}, P_{21-15}), (P_{16-14}, P_{16-19}, P_{24-3}), (P_{20}, P_{20-19}, P_{24-3}), (P_{16}, P_{16-19}, P_{24-3}), (P_{15}, P_{16-14}, P_{16-19}), (P_{15}, P_{20}, P_{20-19}), (P_{15}, P_{16}, P_{16-19}), (P_{8}, P_{8-9}, P_{8-10}), (P_{7}, P_{8}, P_{8-7}), (P_{2}, P_{2-4}, P_{9-4}), (P_{2}, P_{6}, P_{6-2}), (P_{1}, P_{5-1}, P_{5-10})$

4 Conclusões

Este trabalho apresentou uma metodologia para a identificação k-tuplas críticas de baixa cardinalidade em sistemas de medição. A presença destas Ck-tuplas críticas pode afetar os resultados da EE, pois erros grosseiros em C1-tuplas não são detectáveis, enquan-

to os erros em medidas que formam C2-tuplas não podem ser identificados. Embora redundantes, medidas em C3-tuplas indicam vulnerabilidades do sistema de medição a perda de medidas, pois as novas C2-tuplas criados em caso de perda de qualquer medida de C3-tuplas comprometem a depuração de EGs em tais situações.

Na metodologia proposta, a identificação de C3-tuplas é realizada por um algoritmo simples, que utiliza procedimentos tradicionais de identificação de Cmeds e Cconjs, como ferramenta auxiliar. O método é flexível, podendo ser facilmente implementado em estimadores de estado existentes. Os resultados para os testes realizados com o sistema IEEE 24 barras também foram apresentados. A eficácia do algoritmo proposto foi confirmada pelos resultados obtidos. Realizou-se uma breve discussão de como a informação trazida pelos C3-tuplas pode ser utilizada no planejamento do reforço de sistema de medição, de modo a reduzir suas vulnerabilidades tanto quanto possível, sendo resultados apresentados ilustrando esta possível aplicação.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pelo CNPq, FAPERJ e CAPES.

Referências Bibliográficas

- Abur, A. and Gómez-Expósito, A. (2004). Power system state estimation: theory and implementation, Marcel Decker, New York - NY.
- Clements, K. A., Krumpholz, G. R. and Davis, P. W. (1981). "Power system state estimation residual analysis: an algorithm using network topology," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 4, pp. 1779–1787.
- Clements, K. A., Krumpholz, G. R. and Davis, P. W. (1983). "Power system state estimation with measurement deficiency: An observability/measurement placement algorithm." IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 7, pp. 2012–2020.
- Clements, K. A. and Davis, P. W. (1986). "Multiple bad data detectability and identifiability: a geometric approach", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 1, No. 3, pp. 355–360.
- Crainic, E. D. Horisberger, H. P., Do, X. D. and Mukhedkar, D. (1990). "Power Network Observability: The Assessment of the Measurement Strength", IEEE Transactions on Power Systems, Vol 5, No. 4, pp. 1267-1285.
- de Almeida, M. C., Asada, E. N. and Garcia, A. V. (2009) "Identifying critical sets in state estimation using Gram matrix," in Proc. IEEE Power Tech Conference, Bucharest-Romania.
- Do Coutto Filho, M. B., Stacchini de Souza, J. C. and Schilling, M. Th. (2007). "Handling critical data and observability," Electrical Power Components & Systems, Vol. 35, No. 5, pp. 553-573.
- Do Coutto Filho, M. B., Stacchini de Souza, J. C. and Augusto, A. A. (2014). "Critical Measuring Units for State Estimation," in Power System Computation Conference, Wroclaw, pp. 1-7.
- Korres, G. N. and Contaxis, G. C. (1991) "Identification and updating of minimally dependent sets of measurements in state estimation," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 3, pp. 999-1005.
- Kosut, O., Jia, L., Thomas, R., and Tong, L. (2010) "Malicious data attacks on smart grid state estimation: attack strategies and countermeasures," in Proc. IEEE Smart Grid Communications, Gaithersburg, Maryland.
- Liu, Y., Reiter, M. and Ning, P. (2009) "False data injection attacks against state estimation in electric power grids," in 16th ACM Conference on Computer and Communication Security, New York, NY, USA, 2009, pp.21–32.
- London, J. B. A., Alberto, L. F. C. and Bretas, N. G. (2007) Analysis of measurement-set qualitative characteristics for state-estimation purposes, IET Proc. Gen. Transm. & Distrib., Vol. 1, No. 1, pp.39-45.
- Monticelli, A. (1999). State Estimation in Electric Power Systems: A Generalized Approach, Kluwer Academic Publishers, Norwell - MA.
- Phadke, A. G. and Thorp, J. S. (2008). Synchronized phasor measurements and their applications, Springer-Verlag, New York - NY.
- Simões Costa, A., Piazza, T. S., and Mandel, A. (1990). Qualitative methods to solve qualitative problems in power system state estimation, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 5, pp. 941-949.
- Sou, K. C., Sandberg, H. and Johansson, K. (2012) "Computing critical k-tuples in power networks," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, No. 3, pp. 1511-1520.