

# DETECÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE MEDIDAS CONVENCIONAIS ESPÚRIAS COM O AUXÍLIO DE SINCRÓFAZORES NA ESTIMAÇÃO DE ESTADO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

MARCIO A. R. GUIMARAENS, MILTON B. DO COUTTO FILHO, JULIO C. STACCHINI DE SOUZA

*Universidade Federal Fluminense*  
*Rua Passo da Pátria, 156 – Niterói, RJ, CEP 24210-240*  
*E-mails: mguimaraens@id.uff.br, mbrown@ic.uff.br, julio@ic.uff.br*

**Abstract**— Power system state estimation is instrumental in providing real-time data required for a reliable and secure operation of electrical grids. Unprecedented advances in measurement technology have been significantly influencing the research and development of this energy management system advanced function. With the availability of phasor measurement units, there has been a clear interest in building phasor-aided state estimation processes for the benefit of spurious measurement detection and identification, especially under weak observability conditions. This paper presents a data validation scheme capable of detecting and identifying gross errors in conventional measurements. The focus is on building an integrated framework for dealing with the occurrence of multiple bad data, even under low redundancy conditions. The proposed scheme has the advantage of leaving the existing state estimation application software intact — complementing it with an extra estimation module in which phasor measurements are processed separately from the conventional ones — and judging whether the measurement set contains bad data. Numerical results of simulation studies performed on the IEEE 14-bus benchmark system demonstrate the application of the proposed scheme.

**Keywords**— Conventional measurements, phasor measurements, bad data, state estimation, power systems

**Resumo**— A estimação de estado em sistemas de potência desempenha papel fundamental no fornecimento de dados em tempo real, necessários à operação segura e confiável de redes elétricas. Avanços tecnológicos sem precedentes em medição têm influenciado significativamente a pesquisa e desenvolvimento desta função avançada, pertencente a sistemas de gerenciamento de energia em centros de controle. Com a disponibilidade de unidades de medição fasorial, percebe-se um claro interesse em construir processos de estimação de estado auxiliados por sincrofazores, em benefício da depuração de dados, especialmente em condições de fraca observabilidade. Este artigo apresenta um esquema de validação de dados, capaz de detectar e identificar erros grosseiros em medidas convencionais. Em especial, focaliza-se a construção de um arcabouço para lidar com a ocorrência de múltiplos dados errôneos, em condições de baixa redundância (presença de criticidades). O esquema proposto apresenta a vantagem de deixar intacto o aplicativo de estimação de estado já construído — complementando-o com um módulo de estimação extra, no qual medidas fasoriais são processadas separadamente das convencionais — para julgar mais efetivamente se o conjunto de medições convencionais contém dados inaceitáveis. Resultados numéricos de estudos de simulação realizados no sistema de referência IEEE 14-barras ilustram a aplicação do esquema proposto.

**Palavras-chave**— Medidas convencionais, medidas fasoriais, erros grosseiros, estimação de estado, sistemas de potência

## 1 Introdução

Por quase cinco décadas, a estimação de estado em sistemas de potência (EE) vem seguindo uma trajetória com muitos meandros, em que se busca aperfeiçoar seu papel como função indispensável em um sistema de gerenciamento de energia (SGE) para a provisão de dados de tempo real, necessários à operação segura e confiável de redes elétricas (Abur, 2004), (Monticelli, 1999).

Tradicionalmente, os processos de EE atuam sobre medidas cruas obtidas do sistema SCADA (*supervisory control and data acquisition*), especificamente: fluxos e injeções de potência ativa/reactiva; magnitudes de tensão das barras da rede. Tais medidas são frequentemente referidas como medidas SCADA ou convencionais. Muitas vezes, formula-se o problema de EE através do método dos mínimos quadrados ponderados (MQP) e estabelecem-se como subproblemas: a configuração atual da rede; análise de observabilidade/criticidade; filtragem e validação de dados. A EE tem sido reconhecida como

uma função obrigatória para a realização da árdua tarefa de se detectar, identificar e substituir medidas espúrias.

Avanços tecnológicos recentes em sistemas de medição têm influenciado significativamente a pesquisa e desenvolvimento desta função avançada pertencente aos sistemas de gerenciamento de energia em centros de controle. Com a disponibilidade de unidades de medida fasorial (UMFs), percebe-se um claro interesse em construir processos de estimação de estado auxiliados por medidas de sincrofazores, especialmente em benefício da depuração de dados.

As UMFs fornecem medidas diretas do estado da rede, fasores de tensão das barras, e correntes nos ramos sincronizadas via sistema de posicionamento global, GPS - *global positioning system* (Phadke, 2008). Tais medidas são conhecidas como medidas fasoriais ou simplesmente sincrofazores.

Não obstante o entusiasmo com as características de UMFs (em termos de precisão, taxa de amostragem e sincronismo), considerando investimentos financeiros em medição (os previamente realizados e aqueles para atualização tecnológica), acredita-se que

as UMFs deverão ser instaladas paulatinamente, fazendo com que medidas convencionais e fasoriais convivam por um razoável período de tempo.

No contexto da utilização de dados fornecidos por UMFs na EE, duas vertentes podem ser consideradas: (i) formar um conjunto que contenha medidas convencionais e fasoriais para submetê-lo a um único estimador, denominado Híbrido (Bi, 2008), (Valverde, 2011); (ii) manter separados os conjuntos de medidas convencionais e fasoriais e processá-los individualmente através de dois estimadores (Zhou, 2006), (Simões Costa, 2013). Independentemente da abordagem adotada nesta fase de migração de tecnologia de medição, os estudos de EE incluindo sincrofasores têm sido conduzidos com o objetivo maior de melhorar a confiabilidade da solução, notadamente para enfrentar situações em que medidas espúrias estejam presentes (Do Coutto Filho, 2014).

Este artigo apresenta um esquema de validação de dados destinado a detectar e identificar erros grosseiros (EGs) em medidas convencionais. Focaliza-se a construção de um arcabouço em que dois estimadores processem de forma cooperativa medidas convencionais e fasoriais, para lidar com a ocorrência de EGs simultâneos, em condições de redundância crítica nos dados. O esquema proposto apresenta a vantagem de não modificar o aplicativo de EE disponível no SGE, complementando-o com um módulo de estimação extra, no qual medidas fasoriais são processadas separadamente das convencionais, de modo a julgar mais efetivamente se o conjunto de medições convencionais contém dados inaceitáveis. Resultados numéricos de estudos de simulação realizados no sistema de referência IEEE 14-barras ilustram a aplicação do esquema proposto.

## 2 Estimação de Estado: Método dos Mínimos Quadrados Ponderados

Resumidamente, descreve-se nesta seção o processo de EE com base no método MQP, contemplando as seguintes etapas: análise de observabilidade e criticalidade; filtragem; cálculo e análise de resíduos. Mais detalhes encontram-se em (Abur, 2004).

### 2.1 Análise de Observabilidade e Criticalidade

Para realizar com sucesso a tarefa de supervisionar uma rede elétrica, a EE depende principalmente da sua capacidade de observar o estado da rede. Tal capacidade se estabelece pela disponibilidade de medidas, em quantidade, diversidade e localização na rede. Neste contexto, o termo redundância define o excedente de medidas disponíveis levando-se em conta a quantidade de medidas necessária para estimar todas as variáveis de estado.

Trata-se a análise da observabilidade como um problema de natureza estrutural, considerando que tem origem na interdependência existente entre as

variáveis de estado e suas observações (medidas cruas) estabelecida pela configuração da rede. Com isto, a análise clássica de observabilidade utiliza uma série de simplificações numéricas (Do Coutto Filho, 2013), resumindo-se à verificação do posto da matriz de ganho do processo de filtragem, presente em (3).

Já a análise de criticalidade assume contornos mais sofisticados, dependendo do grau de observabilidade que se pretenda avaliar (Augusto, 2016). Considerando o processamento de EGs, as criticalidades mais frequentemente analisadas são as de primeiro grau e segundo grau (cardinalidade dois). Em outras palavras, analisa-se a presença de medidas críticas (Cmeds) e a formação de pares críticos de medidas, reunidos em conjuntos críticos (Cconjs).

Classifica-se uma medida como Cmed caso sua indisponibilidade leve à perda de observabilidade da rede. Já qualquer medida pertencente a um par crítico ao se tornar indisponível faz com que sua parilha torne-se Cmed. Claro que, se ambas as medidas do par crítico tornarem-se simultaneamente indisponíveis, a rede se tornar inobservável. Pares críticos com medidas em comum formam Cconjs.

Para a identificação Cmeds e Cconjs, podem ser utilizadas as propriedades dos resíduos  $\mathbf{r}$  das medidas (diferenças, definidas em (7), entre valores medidos  $\mathbf{z}$  e estimados  $\hat{\mathbf{z}}$ ) que apresentem estas criticalidades (Abur, 2004):

- *Propriedade 1:* Resíduos de Cmeds são nulos e totalmente não correlacionados. Se a  $i$ -ésima medida disponível  $z(i)$  for uma Cmed, então:

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

- *Propriedade 2:* Resíduos normalizados, definidos em (8), de medidas pertencentes à Cconjs são iguais e totalmente correlacionados. Se um par de medidas ( $z(k)$ ,  $z(j)$ ) pertencer a um Cconj, então:

$$\mathbf{r}_N(k) / \mathbf{r}_N(j) = 1$$

As correlações mencionadas nas propriedades 1 e 2 são aquelas extraídas de (8). Os elementos da matriz  $\mathbf{U}$  indicam o grau de interação entre as medidas.

A presença de Cmeds e Cconjs indica que a capacidade de observação do estado do sistema aproxima-se do colapso. Como grave consequência, EGs que porventura tenham contaminado Cmeds não poderão ser detectados/identificados por seus resíduos (serão sempre nulos). E, também, EGs se estiverem entre as medidas de um Cconj, embora sejam detectáveis, não serão identificados, por serem sempre numericamente iguais. Em resumo, estes eventos são um problema em aberto para a EE convencional. Mais adiante, este artigo mostra como as medidas fasoriais poderão ser usadas para se encontrar uma solução para o problema.

## 2.2 Filtragem

O modelo não-linear que descreve a relação estado e sua observação (medidas) caracteriza-se pela seguinte equação:

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{v} \quad (1)$$

onde:  $\mathbf{x}$  – vetor de estado ( $n \times 1$ ), composto pelos ângulos de fase e magnitudes das tensões das barras;  $\mathbf{z}$  – vetor das medidas cruas ( $m \times 1$ );  $\mathbf{h}$  – vetor das equações de fluxo de potência ( $m \times 1$ ), para a configuração atual da rede;  $\mathbf{v}$  – vetor dos erros de medição ( $m \times 1$ ), para o qual admite-se a distribuição Normal de média zero e matriz de covariância  $\mathbf{R}$ .

A função-objetivo para processo de filtragem do estado através do método MQP é dada por:

$$J(\mathbf{x}) = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] \quad (2)$$

O estado estimado  $\hat{\mathbf{x}}$  que minimiza  $J(\mathbf{x})$  pode ser obtido iterativamente através de:

$$\begin{aligned} \mathbf{G}\Delta\mathbf{x} &= \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}^{(\ell)})] \\ \mathbf{x}^{(\ell+1)} &= \mathbf{x}^{(\ell)} + \Delta\mathbf{x} \end{aligned} \quad (3)$$

onde:  $\mathbf{G} = \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}$  – matriz de ganho ( $n \times n$ );  $\mathbf{H} = \partial \mathbf{h} / \partial \mathbf{x}$  – matriz Jacobiano ( $m \times n$ ), calculada em  $\mathbf{x} = \mathbf{x}^{(\ell)}$ ;  $\ell$  – contador de iterações.

A matriz  $\mathbf{S}$ , que representa a covariância do erro na estimação do estado, é dada por:

$$\mathbf{S} = (\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \quad (4)$$

Então as medidas estimadas são obtidas por:

$$\hat{\mathbf{z}} = \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}) \quad (5)$$

E a matriz  $\mathbf{T}$ , covariância do erro na estimação das medidas, é obtida a partir de  $\mathbf{S}$ :

$$\mathbf{T} = \mathbf{H} \mathbf{S} \mathbf{H}^T \quad (6)$$

sendo:  $\mathbf{H} = \partial \mathbf{h} / \partial \mathbf{x}$ , avaliado em  $\mathbf{x} = \hat{\mathbf{x}}$ .

## 2.3 Cálculo de Resíduos

Considerando  $\mathbf{r}(i)$  como a  $i$ -ésima componente do vetor de resíduos da estimação, aquela que contém a diferença entre o valor da medida crua (componente do vetor  $\mathbf{z}$ ) e o correspondente valor estimado extraído de  $\hat{\mathbf{z}} = \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})$ , vem:

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

Admite-se que o processo estabelecido em (7) seja Gaussiano com média zero e matriz de covariância  $\mathbf{U}$  dado por:

$$\mathbf{U} = \mathbf{R} - \mathbf{T} \quad (8)$$

Usualmente, normaliza-se  $\mathbf{r}$  para submetê-lo à seguinte validação estatística (teste  $r_N$ ):

$$r_N(i) = |\mathbf{r}(i)| / \sigma_U(i) \leq \text{limiar de detecção} \quad (9)$$

onde  $\sigma_U(i) = \sqrt{\mathbf{U}(i,i)}$  – desvio padrão da  $i$ -ésima componente do vetor  $\mathbf{r}$ ;  $\mathbf{U}(i,i)$  – elemento da  $i$ -ésima linha e  $i$ -ésima coluna da matriz  $\mathbf{U}$ . Se houver violação do limiar pré-estabelecido (usualmente, igual a 3), as medidas correspondentes são colocadas sob suspeita de estarem contaminadas por EGs.

## 2.4 Análise de Resíduos

A validação de dados através da análise de resíduos torna-se onerosa computacionalmente quando EGs surgem entre as medidas processadas. Isto se deve ao chamado efeito de espalhamento de erros, fazendo com que não só as medidas corrompidas apresentem resíduos elevados, mas também algumas medidas sadias. Note que há uma interdependência entre as variáveis de estado estimadas (obtidas pelo processamento das medidas cruas recebidas) e as medidas estimadas correspondentes, conforme estabelecido em (5).

Na presença de EGs, aquelas componentes do vetor de estado que se relacionam com as medidas cruas corrompidas ao serem estimadas sofrerão contaminação. Conseqüentemente, as medidas estimadas dependentes das componentes contaminadas do estado estimado também se contaminarão. Deste modo, os valores de algumas medidas cruas sadias ao serem comparados com seus respectivos valores estimados (aqueles que tenham sido contaminados) apresentarão resíduos elevados. Assim, vários dos resíduos que excederem o limiar de detecção de erros normais poderão estar associados a medidas cruas válidas, erroneamente colocadas sob suspeição. Logo, este espalhamento de EGs compromete a eliminação em bloco de dados espúrios, o que muitas vezes sobrecarrega bastante o processo de validação de dados.

Quando apenas uma medida crua estiver contaminada (EG simples), a componente do resíduo normalizado de maior valor calculado em (9) será o desta medida crua espúria, desde que tal medida não seja uma Cmed ou pertença a um Cconj. Deve-se enfatizar que o resíduo de uma Cmed será sempre nulo, assim como seu desvio-padrão (desnecessária a normalização deste resíduo). E também que os resíduos de medidas integrantes de Cconjs serão numericamente iguais (havendo detecção do EG), o que leva todas as medidas de um Cconj a serem postas sob suspeição (não identificação do EG).

Já nos casos em que várias medidas cruas estejam contaminadas (EGs múltiplos), sua identificação envolve um problema combinatorial difícil. Isto decorre do efeito de espalhamento de EGs, que resulta em aplicações sucessivas do teste  $r_N$ , em que se faz inicialmente a remoção de medidas suspeitas uma-a-

uma, para (continuada a violação) em seguida combiná-las duas-a-duas, três-a-três, e assim por diante.

A solução deste problema em aberto estará na obtenção de resíduos não correlacionados, o que será alcançado com o auxílio de sincrofasores no processo de EE, conforme se descreve a seguir.

### 3 Estimação de Estado com Sincrofasores

Com foco na tarefa de validação dos dados submetidos à EE, amalgamar medidas convencionais e fasoriais, processando-as em um único estimador, poderia ser vantajoso. Isto porque o aumento da redundância dos dados a processar acarreta condições mais favoráveis para a detecção/identificação de EGs. Entretanto, o processamento integrado de todas estas medidas disponíveis faz com que o efeito de espalhamento de EGs continue a existir.

Alternativamente, em vez de se agregar em um só conjunto de dados medidas convencionais e fasoriais, pode-se adotar um procedimento em que tais medidas, formando conjuntos separados de dados, sejam processadas por estimadores distintos. Neste caso, as análises de resíduos realizadas em processos de estimação separados e independentes poderão contribuir de forma cooperativa para a construção de estratégias, nas quais o efeito de espalhamento de EGs (em muitos casos) seja praticamente eliminado, fazendo com que tais erros venham a ser eliminados em bloco.

Considerando que muitas vezes há uma certa resistência em se modificar o que já está estabelecido, nota-se uma inclinação por se manter intacto o aplicativo computacional de EE instalado em um SGE. Assim sendo, a opção pelo uso de dois estimadores independentes, conhecida pela sigla PHASE (*phasor-aided state estimation*) tem sido bem aceita e aqui será adotada.

#### 3.1 Abordagem PHASE

Dois estimadores (não lineares), com base no método MQP, são adotados nesta abordagem do problema de EE, destinados a processar, independentemente e individualmente, mas de forma cooperativa, sincrofasores e medidas convencionais. Tais estimadores serão referidos como Sync e Conv, respectivamente, sendo usados sobrescritos para denotar em qual dos estimadores estará sendo realizado o processo de estimação. Para que fique bem claro, a seguinte notação será usada no cálculo de vetores e matrizes:

- $\hat{\mathbf{x}}^{(\text{conv})}$  vetor de estado, estimado por Conv;
- $\hat{\mathbf{x}}^{(\text{sync})}$  vetor de estado, estimado por Sync;
- $(\cdot)_{\text{conv}}^{(\text{conv})}$  vetor ou matriz com relação a medidas convencionais, usando-se  $\hat{\mathbf{x}}^{(\text{conv})}$ ;
- $(\cdot)_{\text{sync}}^{(\text{conv})}$  vetor ou matriz com relação a sincrofasores, usando-se  $\hat{\mathbf{x}}^{(\text{conv})}$ ;

- $(\cdot)_{\text{conv}}^{(\text{sync})}$  vetor ou matriz com relação a medidas convencionais, usando-se  $\hat{\mathbf{x}}^{(\text{sync})}$ ;
- $(\cdot)_{\text{sync}}^{(\text{sync})}$  vetor ou matriz com relação a sincrofasores, usando-se  $\hat{\mathbf{x}}^{(\text{sync})}$ .

A seguir, apresentam-se os cálculos necessários à aplicação dos testes de resíduos normalizados dos estimadores Sync e Conv, que irão atuar de forma cooperativa para a depuração de dados.

#### A) Estimador Sync

O estado estimado  $\hat{\mathbf{x}}^{(\text{sync})}$  é obtido, com a respectiva matriz de covariância do erro de estimação,  $\mathbf{S}^{(\text{sync})}$ , a partir do processamento de sincrofasores apenas ( $\mathbf{z}_{\text{sync}}; \mathbf{R}_{\text{sync}}$ ). Em seguida, usando  $\hat{\mathbf{x}}^{(\text{sync})}$ , o vetor contendo as estimativas de medidas convencionais,  $\hat{\mathbf{z}}_{\text{conv}}^{(\text{sync})} = \mathbf{h}_{\text{conv}}(\hat{\mathbf{x}}^{(\text{sync})})$ , e também a correspondente matriz de covariância do erro de estimação das medidas,  $\mathbf{M}_{\text{conv}}^{(\text{sync})}$ , são calculados:

$$\mathbf{M}_{\text{conv}}^{(\text{sync})} = [\mathbf{H}_{\text{conv}}^{(\text{sync})}] \mathbf{S}^{(\text{sync})} [\mathbf{H}_{\text{conv}}^{(\text{sync})}]^t \quad (10)$$

onde  $[\mathbf{H}_{\text{conv}}^{(\text{sync})}] = \partial \mathbf{h}_{\text{conv}} / \partial \mathbf{x}$ , matriz Jacobiano das medidas convencionais, calculada em  $\mathbf{x} = \hat{\mathbf{x}}^{(\text{sync})}$ ;  $\mathbf{S}^{(\text{sync})} = \{[\mathbf{H}_{\text{sync}}^{(\text{sync})}]^t [\mathbf{R}_{\text{sync}}]^{-1} [\mathbf{H}_{\text{sync}}^{(\text{sync})}]\}^{-1}$ ;  $[\mathbf{H}_{\text{sync}}^{(\text{sync})}] = \partial \mathbf{h}_{\text{sync}} / \partial \mathbf{x}$  matriz Jacobiano de sincrofasores, computada em  $\mathbf{x} = \hat{\mathbf{x}}^{(\text{sync})}$ . Assim, considerando que  $\mathbf{z}_{\text{conv}}^{(\text{sync})}(i)$  é a  $i$ -ésima componente do vetor que contém apenas medidas convencionais, as seguintes diferenças podem ser calculadas:

$$\mathbf{r}_{\text{conv}}^{(\text{sync})}(i) = \mathbf{z}_{\text{conv}}^{(\text{sync})}(i) - \hat{\mathbf{z}}_{\text{conv}}^{(\text{sync})}(i) \quad (11)$$

A matriz  $\mathbf{V}_{\text{conv}}^{(\text{sync})}$ , covariância de  $\mathbf{r}_{\text{conv}}^{(\text{sync})}$ , obtém-se por:

$$\mathbf{V}_{\text{conv}}^{(\text{sync})} = \mathbf{R}_{\text{conv}} + \mathbf{M}_{\text{conv}}^{(\text{sync})} \quad (12)$$

onde a matriz  $\mathbf{R}_{\text{conv}}$  é a covariância do vetor erro de medidas convencionais.

As componentes do vetor  $\mathbf{r}_{\text{conv}}^{(\text{sync})}$  são normalizadas e submetidas ao seguinte teste de validação:

$$\mathbf{r}_{\text{Nconv}}^{(\text{sync})}(i) = \left| \mathbf{r}_{\text{conv}}^{(\text{sync})}(i) \right| / \sigma_{\mathbf{V}_{\text{conv}}^{(\text{sync})}}(i) \leq \text{limiar} \quad (13)$$

onde  $\sigma_{\mathbf{V}_{\text{conv}}^{(\text{sync})}}(i) = \sqrt{\mathbf{V}_{\text{conv}}^{(\text{sync})}(i, i)}$ .

Note que os cálculos realizados no estimador Sync vêm em auxílio ao processo de validação de medidas convencionais. Os resíduos normalizados obtidos em (13) são não correlacionados, pois referem-se a diferenças entre as medidas convencionais cruas e suas respectivas estimativas obtidas pelo estimador Sync que só processou medidas fasoriais.

### B) Estimador Conv

Os cálculos com o estimador Conv relativos ao processamento de apenas medidas convencionais ( $\mathbf{z}_{\text{conv}}; \mathbf{R}_{\text{conv}}$ ) são apresentados a seguir.

$$\hat{\mathbf{z}}_{\text{conv}}^{(\text{conv})} = \mathbf{h}_{\text{conv}}(\hat{\mathbf{x}}^{(\text{conv})}) \quad (14)$$

$$\mathbf{T}_{\text{conv}}^{(\text{conv})} = [\mathbf{H}_{\text{conv}}^{(\text{conv})}] \mathbf{S}^{(\text{conv})} [\mathbf{H}_{\text{conv}}^{(\text{conv})}]^t \quad (15)$$

onde o vetor  $\hat{\mathbf{x}}^{(\text{conv})}$  representa o estado estimado e sua matriz de covariância do erro de estimação  $\mathbf{S}^{(\text{conv})}$ ;  $\hat{\mathbf{z}}_{\text{conv}}^{(\text{conv})}$  é o vetor de estimativas de medidas convencionais e  $\mathbf{T}_{\text{conv}}^{(\text{conv})}$  a matriz de covariância do erro da estimação das medidas.

$$\mathbf{r}_{\text{conv}}^{(\text{conv})}(i) = \mathbf{z}_{\text{conv}}(i) - \hat{\mathbf{z}}_{\text{conv}}^{(\text{conv})}(i) \quad (16)$$

$$\mathbf{U}_{\text{conv}}^{(\text{conv})} = \mathbf{R}_{\text{conv}} - \mathbf{T}_{\text{conv}}^{(\text{conv})} \quad (17)$$

onde  $\mathbf{r}_{\text{conv}}^{(\text{conv})}(i)$  representa o resíduo da estimação da  $i$ -ésima medida convencional, com desvio-padrão

$$\sigma_{U_{\text{conv}}^{(\text{conv})}}(i) = \sqrt{\mathbf{U}_{\text{conv}}^{(\text{conv})}(i, i)}.$$

As componentes do vetor  $\mathbf{r}_{\text{conv}}^{(\text{conv})}$  são normalizadas e submetidas à seguinte verificação:

$$\mathbf{r}_{\text{Nconv}}^{(\text{conv})}(i) = \left| \mathbf{r}_{\text{conv}}^{(\text{conv})}(i) \right| / \sigma_{U_{\text{conv}}^{(\text{conv})}}(i) \leq \text{limiar} \quad (18)$$

Na Figura 1, encontra-se um diagrama de blocos simplificado dos cálculos realizados nos estimadores Sync e Conv, atuando de forma cooperativa, para o processamento de EGs. Para não sobrecarregar a figura, o procedimento de diagnóstico sobre a presença de EGs (detecção e identificação) não foi explicitado, deixando-se sua descrição para a Seção 3.2.

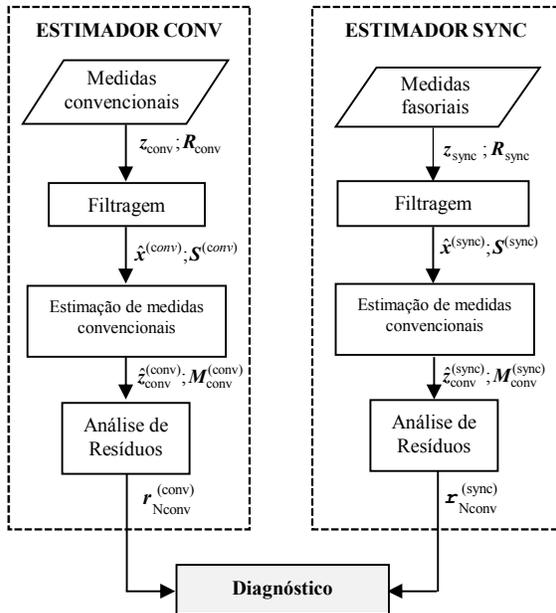


Figura 1. Diagrama de blocos de PHASE

### 3.2 Diagnóstico sobre Erros Grosseiros

Com abordagem PHASE, a avaliação combinada dos testes dos resíduos produzidos nos estimadores Sync e Conv facilita sobremaneira o diagnóstico quanto a possível presença de EGs.

Considerando que a instalação de UMFs encontra-se em curso, admite-se que a disponibilidade de sincrofasores ainda seja limitada. Assim, espera-se que o estimador Sync inicialmente processe tantas medidas fasoriais quanto sejam necessárias para a mínima observabilidade da rede como um todo. Se isto não for alcançado, os benefícios de PHASE para o processamento de EGs serão atingidos naquelas áreas da rede observadas por UMFs.

Neste artigo, apresenta-se uma estratégia para a detecção e identificação de EGs em medidas convencionais. Considera-se a possibilidade de que o sistema de medição possa apresentar redundância muita baixa, atingindo níveis críticos, o que compromete a detecção e identificação de EGs por meio dos resíduos da estimação convencional. Supõe-se que os sincrofasores disponíveis para auxiliar a EE não estejam corrompidos, deixando para trabalhos futuros a construção de esquemas que tratem da ocorrência simultânea (menos provável) de EGs em ambos os tipos de medidas.

Situações em que não haja a presença de Cmeds, violações em ambos os testes de resíduos, i.e.

$\mathbf{r}_{\text{Nconv}}^{(\text{sync})}$  e  $\mathbf{r}_{\text{Nconv}}^{(\text{conv})}$ , indicam a presença de EGs entre as medidas. Note que, devido ao efeito de espalhamento de erros, diversas componentes de  $\mathbf{r}_{\text{Nconv}}^{(\text{conv})}$  poderão ultrapassar o limiar, colocando assim sob suspeição medidas que não portem EGs. Para a correta identificação de quais medidas são de fato EGs, selecionam-se no vetor  $\mathbf{r}_{\text{Nconv}}^{(\text{sync})}$  as componentes que ultrapassarem o limiar de detecção. As medidas identificadas como portadoras de EGs podem ser substituídas em bloco por suas respectivas estimativas extraídas do vetor  $\hat{\mathbf{z}}_{\text{conv}}^{(\text{sync})} = \mathbf{h}_{\text{conv}}(\hat{\mathbf{x}}^{(\text{sync})})$  e ponderadas pelo elemento da diagonal da matriz  $\mathbf{M}_{\text{conv}}^{(\text{sync})}$  calculada em (10). Este procedimento de identificação e substituição de medidas espúrias torna-se muito mais atrativo do que aquele tradicionalmente adotado de ciclos "estimação-análise de resíduos-eliminação de medidas", de base combinatória.

Já situações mais adversas, em que Cmeds e Cconjs estejam presentes, requerem um cuidado especial. Lembre-se que Cmeds (medidas não redundantes) apresentarão valores sempre nulos em  $\mathbf{r}_{\text{Nconv}}^{(\text{conv})}$ , que não levantam suspeitas, estando estas medidas corrompidas ou não. Além disto, EGs em Cmeds não produzem espalhamento, fazendo-os passar incógnitos pelo teste de resíduos. Por outro lado, Cconjs são compostos por medidas cujos resíduos são numericamente iguais em  $\mathbf{r}_{\text{Nconv}}^{(\text{conv})}$ , o que não permite a identificação de quais medidas portam

EGs. Em contrapartida, o vetor  $\mathbf{r}_{N_{\text{conv}}}^{(\text{sync})}$  obtido pelo estimador Sync indica as componentes que violam o limiar de detecção, portanto, quais as medidas portadoras de EGs, independentemente de serem redundantes, pertencentes a Conj ou Cmeds.

#### 4 Resultados Numéricos

Esta seção apresenta resultados ilustrativos da aplicação do esquema proposto para a detecção e identificação de EGs, obtido a partir da cooperação entre estimadores convencionais e fasoriais. Adotouse o sistema IEEE 14-barras, com um plano de medição em que há criticalidade de medidas. A Figura 2 mostra o sistema de medição adotado, em que as medidas de fluxo e injeção de potência foram tomadas aos pares. As UMFs alocadas nas barras 2, 6, 7 e 9 fornecem sincrofasores de tensão das referidas barras e das correntes dos ramos nelas incidentes. A análise de observabilidade indicou que o sistema é plenamente observável, considerando-se individualmente os grupos de medidas convencionais e fasoriais. As criticalidades existentes são as seguintes:

- Cmeds: P<sub>1-2</sub>
- Cconjs: #1 = {P<sub>2-3</sub>, P<sub>3</sub>, P<sub>6</sub>}
- #2 = {P<sub>4-7</sub>, P<sub>9</sub>}
- #3 = {P<sub>7-8</sub>, P<sub>8-7</sub>}

As simulações realizadas inicialmente correspondem à inserção de EGs simples e múltiplos em medidas que envolvam criticalidades. Em seguida, tais erros foram inseridos em medidas que não fazem parte das criticalidades apontadas.

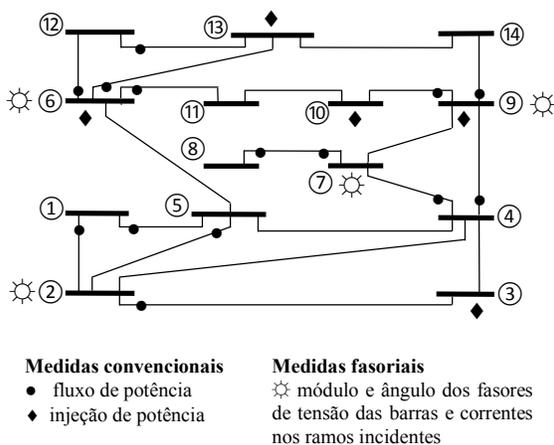


Figura 2. Sistema IEEE 14-barras

#### Caso 1: EG na Cmed P<sub>1-2</sub>

Como era de se esperar, o estimador Conv, através dos resíduos  $\mathbf{r}_{N_{\text{conv}}}^{(\text{conv})}$ , não foi capaz de detectar a presença de nenhuma anormalidade em qualquer das medidas convencionais processadas, incluindo a Cmed em que o EG foi introduzido. Já o teste  $\mathbf{r}_{N_{\text{conv}}}^{(\text{sync})}$  detectou e identificou apenas uma medida espúria (P<sub>1-2</sub>).

#### Caso 2: EG em P<sub>9</sub>, pertencente ao Cconj#2

O teste  $\mathbf{r}_{N_{\text{conv}}}^{(\text{conv})}$  aponta como suspeitas as medidas P<sub>4-7</sub>, P<sub>4-9</sub>, P<sub>9-10</sub>, P<sub>9-14</sub> e P<sub>9</sub>, situação que em constata-se o efeito de espalhamento do EG simples simulado. Note que, apesar de o resíduo normalizado de P<sub>9</sub> apresentar o valor mais alto dentre os que ultrapassam o limiar de detecção, a identificação de P<sub>9</sub> como EG não será possível. Isto porque ao se eliminar P<sub>9</sub>, P<sub>4-7</sub> torna-se uma Cmed e mais nada de anormal aponta-se entre as medidas remanescentes, o que falsamente indicaria ausência de EGs. Felizmente, o mesmo não acontece com o teste  $\mathbf{r}_{N_{\text{conv}}}^{(\text{sync})}$  que corretamente aponta para P<sub>9</sub> como única medida suspeita de contaminação.

#### Caso 3: EGs múltiplos nas medidas P<sub>1-2</sub> (Cmed), P<sub>3</sub>, P<sub>6</sub> (Cconj#1, em parte), P<sub>4-7</sub>, P<sub>9</sub> (Cconj#2, completo)

Com a simulação de 5 EGs simultâneos, o efeito de espalhamento ocorreu com intensidade, indicando falsamente como suspeitas (além daquelas de fato corrompidas) mais 7 medidas (39 %), a saber: P<sub>2-3</sub>, P<sub>4-9</sub>, P<sub>5-2</sub>, P<sub>6-11</sub>, P<sub>6-12</sub>, P<sub>6-13</sub>, P<sub>10</sub>.

#### Caso 4: EG na medida P<sub>6-13</sub>

Neste caso de simulação de EG simples, a medida espúria não é Cmed, nem participa de um Cconj. Aqui foi incluída, para estressar o efeito de espalhamento de erro no estimador Conv. A medida de maior resíduo normalizado em  $\mathbf{r}_{N_{\text{conv}}}^{(\text{conv})}$  foi de fato aquela que contém o EG simulado, mas além dela mais 8 foram apontadas como suspeitas (espalhamento de cerca de 44%). Em  $\mathbf{r}_{N_{\text{conv}}}^{(\text{sync})}$ , apenas P<sub>6-13</sub> é apontada como suspeita. Após esta medida ser substituída por sua estimativa,  $\hat{\mathbf{z}}_{N_{\text{conv}}}^{(\text{sync})} = \mathbf{h}_{N_{\text{conv}}}(\hat{\mathbf{x}}^{(\text{sync})})$ , com ponderação extraída de  $\mathbf{M}_{N_{\text{conv}}}^{(\text{sync})}$ , nenhum resíduo normalizado ultrapassa o limiar de detecção de EGs.

Aqui, simula-se a introdução de 4 EGs, todos ocorrendo simultaneamente nas medidas tomadas na barra 6, i.e., em  $P_{6-11}$ ,  $P_{6-12}$ ,  $P_{6-13}$  e  $P_6$ . Mais uma vez, ocorre um acentuado espalhamento de erros (cerca de 39%), requerendo que várias combinações de medidas suspeitas sejam feitas, em ciclos de estimação-análise de resíduos-eliminação de medidas, até que se conclua sobre quais medidas de fato são portadoras de EGs. Novamente, confirma-se com o teste  $\mathbf{r}_{N_{conv}}^{(sync)}$  que apenas as medidas portadoras de EGs são apontadas como suspeitas, podendo ser substituídas em bloco.

## 5 Conclusão

Este artigo apresentou um esquema para a detecção e identificação de medidas espúrias, desenvolvido a partir da cooperação entre dois estimadores de estado que processam em separado conjuntos independentes de medidas fasoriais e convencionais. De uma só vez, o esquema proposto identifica todos os erros grosseiros que porventura estejam presentes em medidas convencionais. Assim, evita-se o tedioso e ineficiente processo de identificação de medidas com erros grosseiros, comumente adotado na análise de resíduos levada a efeito por estimadores híbridos. Ilustrou-se a aplicação prática da metodologia proposta com estudos de simulação, conduzidos no sistema IEEE 14-barras, contemplando-se situações em que o sistema de medição estivesse atravessando condições críticas de redundância. Os resultados encontrados são promissores e apontam para a continuidade da pesquisa, vislumbrando-se o tratamento de erros grosseiros múltiplos em medidas convencionais e fasoriais, simultaneamente.

## Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos às agências de fomento CNPq, CAPES, FAPERJ, e ao INERGE pelo apoio financeiro destinado à esta pesquisa.

## Referências Bibliográficas

- Abur, A. and Gómez-Expósito, A. (2004). Power system state estimation: theory and implementation. Marcel Decker, New York - NY.
- Augusto, A. A., Do Coutto Filho, M. B., Stacchini de Souza, J. C., and Miranda, V. (2016). "Probabilistic assessment of state estimation capabilities for grid observation", IET Proc. Gen., Transm. & Distrib., vol. 10, no. 12, pp. 2933-2941.
- Bi, T. S., Qin, X. H., and Yang, Q. X. (2008). "A novel hybrid state estimator for including synchronized phasor measurements", Elect. Power Syst. Res., vol. 78, no. 8, pp.1343-1352.
- Do Coutto Filho, M. B., Stacchini de Souza, J. C., and Guimaraens, M. A. R. (2014). "Enhanced Bad Data Processing by Phasor-Aided State Estimation", IEEE Trans. Power Syst., vol. 29, no. 5, pp. 2200-2209.
- Do Coutto Filho, M. B., Stacchini de Souza, J. C., and Villavicencio Tafur, J. E. (2013). "Quantifying Observability in State Estimation", IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 3, pp. 2897-2906.
- Monticelli, A. (1999). Power system state estimation: a generalized approach. Kluwer, Norwell - MA.
- Phadke, A. G. and Thorp, J. S. (2008). Synchronized phasor measurements and their applications. Springer, New York - NY.
- Simões Costa, A. J. A., Albuquerque, A., and Bez, D. (2013). "An estimation fusion method for including phasor measurements into power system real-time modeling", IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 2, pp. 1910-1920.
- Valverde, G., Chakrabarti, S., Kyriakides, E., and V. Terzija (2011). "A constrained formulation for hybrid state estimation", IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 3, pp. 1102-1109.
- Zhou, M., Centeno, V. A., Thorp, J. S., and Phadke, A. G. (2006). "An alternative for including phasor measurements in state estimators", IEEE Trans. Power Syst., vol. 21, no. 4, pp. 1930-1937.