XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

CB/GOP/20

GRUPO - IX

GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GOP

DEPURAÇÃO DE ERROS GROSSEIROS VIA CRUZAMENTO DE INFORMAÇÕES EM ARQUITETURAS DE ESTIMAÇÃO DE ESTADOS BASEADAS EM MÉTODOS DE FUSÃO

Antonio José Alves Simões Costa (*)
LABSPOT, UFSC

Rodolfo Mussiato Gonçalves
LABSPOT, UFSC

RESUMO

Este informe técnico propõe melhorias na depuração dos efeitos de medidas espúrias processadas por estimadores de estados em redes elétricas monitoradas tanto por medidas convencionais quanto fasoriais. O aspecto diferencial da proposta é a exploração da possibilidade de se cruzar informações adquiridas de forma independente pelos sistemas SCADA e de medição fasorial sincronizada, em adição à aplicação seletiva de diferentes métodos de detecção e identificação de Erros Grosseiros (EGs). A confrontação de estimativas independentes é favorecida pela arquitetura de fusão adotada para a estimação de estados. Concluída a etapa de tratamento de erros grosseiros para ambas as classes de medidas, a qualidade alcançada para as estimativas finais pode ser avaliada ao final do processo de fusão de estimativas. Um sistema-teste de médio porte do IEEE 118-barras é utilizado para ilustrar e avaliar a aplicação dos métodos propostos.

PALAVRAS-CHAVE

Processamento de erros grosseiros, estimação de estados em sistemas de potência, medidas fasoriais sincronizadas, fusão de estimativas.

1.0 - INTRODUÇÃO

A Estimação de Estados em Sistemas de Potência (EESP) exerce um papel fundamental na operação em tempo real de sistemas elétricos de potência, já que é a função encarregada de disponibilizar informações confiáveis em tempo real à respeito do ponto de operação do sistema de potência, as quais subsidiam os aplicativos responsáveis por garantir uma operação segura da rede elétrica [1], [2]. Para cumprir seu objetivo, a EESP processa medidas adquiridas em tempo real de grandezas que descrevem o comportamento do sistema, e fornece como produto valores atualizados de módulo e ângulo das tensões em todas as barras da rede elétrica. Estes valores são conhecidos como estados do sistema, pois seu conhecimento torna possível a determinação de qualquer outra grandeza associada à condição de operação corrente.

Tradicionalmente, os estimadores de estado são alimentados exclusivamente por um sistema de aquisição de dados assíncronos que refletem as condições de operação da rede elétrica, que são transmitidos para o processamento no centro de operações. Os dados oriundos deste sistema, conhecido pela sigla SCADA (do termo em Inglês *Supervisory Control and Data Acquisition*), são referidos neste informe técnico como *medidas convencionais.*

Porém, o avanço obtido nas ferramentas de monitoração impulsionados pelo advento dos sistemas de medição fasorial sincronizada [3] vem alterando este cenário. Verifica-se hoje uma gradual mas crescente penetração de PMUs (da sigla em Inglês para *Phasor Measurements Units*) nos sistemas de potência. A partir desta nova forma de

(*) Prof. Antonio Simões Costa – Departamento de Engenharia Elétrica – CTC – UFSC – Campus Trindade
CEP 88.040-900 Florianópolis, SC, – Brasil - Tel: (+55 48) 3721-4987 – Fax: (+55 48) 3721-9280 –
Email: simoes.costa@ufsc.br

instrumentação, medidas fasoriais sincronizadas também estão sendo disponibilizadas para os centros de operação. Este fato gera novas perspectivas para a monitoração e análise de segurança da rede elétrica.

O interesse na utilização destas novas medidas ocorre principalmente por duas razões. Quando comparadas às obtidas via sistema SCADA, as medidas fasoriais são disponibilizadas com uma taxa de amostragem muito superior. Além disso, apresentam um maior nível de exatidão. Essas vantagens alavancaram um crescente interesse na integração das medidas fasoriais também na estimação de estados, uma vez que a combinação das duas classes de medidas pode potencialmente proporcionar melhorias significativas para os processos de monitoração e análise de segurança do sistema de potência.

Diversos caminhos foram trilhados com o intuito de aprimorar a estimação de estados a partir da integração das medidas fasoriais, como por exemplo as estratégias utilizadas em [4], [5], [6] e [7]. Dentre essas, merece particular atenção o método de fusão de estimativas apresentado em [6] e [7] pois, além de apresentar resultados consistentes, possui um grande apelo prático pelo fato de utilizar um módulo de estimação para cada uma das classes de medida. Este fato implica em uma série de vantagens, como por exemplo viabilizar o aproveitamento de estimadores convencionais já existentes nos centros de operação. Por este motivo, essa é a abordagem utilizada para integração das duas classes de medidas neste trabalho.

Em que pesem suas qualidades, as medidas fasoriais, assim como as convencionais, são igualmente suceptíveis a erros de medição [3], [8]. Considerando a conhecida sensibilidade dos algoritmos convencionais de estimação de estados à presença de dados espúrios, é muito importante que o estimador de estados seja capaz de expurgar ou recuperar medidas errôneas presentes tanto no plano de medição convencional como no conjunto de medidas fasoriais. Estas constatações são as principais motivações para o desenvolvimento deste trabalho.

Ainda são poucas as metodologias propostas na literatura técnica para o processamento de erros grosseiros associados às duas classes de medidas. Dentre estas, deve ser destacada a contribuição apresentada recentemente em [9], cuja ideia principal é utilizar a independência estatística entre as duas classes de medidas para facilitar a depuração de dados espúrios. Esta abordagem apresenta o potencial de identificar, e possivelmente recuperar, medidas contaminadas com Erros Grosseiros (EGs) através do cruzamento de informações obtidas individualmente a partir de cada um dos módulos de estimação. Para que todos os cenários de contaminação por erros grosseiros sejam considerados, faz-se necessário combinar o cruzamento de informações com um método eficiente de processamento de medidas espúrias. Neste particular, entretanto, a proposta descrita em [9] se restringe à aplicação do método clássico com base nos resíduos normalizados [10].

Este trabalho aprofunda a metodologia proposta em [9] no sentido de explorar técnicas mais elaboradas para o tratamento de erros grosseiros, tais como o método-$\hat{b}$ [1] e a identificação baseada em testes de hipóteses, ou HTI [11]. O objetivo é apontar a combinação de métodos mais efetiva para o processamento de medidas espúrias em sistemas de potência monitorados por medidas convencionais e fasoriais. Ao final, o processo de avaliação das alternativas consideradas é validado verificando-se a qualidade dos resultados fornecidos pela realização da fusão das estimativas individuais.

Após esta seção introdutória, o informe técnico revê na Seção 2 os princípios básicos da EESP, além de abordar a teoria da fusão de estimativas. A Seção 3 apresenta os métodos de processamento de erros grosseiros avaliados. Os resultados de simulações numéricas acompanhados de suas respectivas análises são discutidos na Seção 4. Finalmente, as conclusões são sumarizadas na Seção 5.

2.0 - ESTIMAÇÃO DE ESTADOS E FUSÃO DE ESTIMATIVAS

2.1 Modelo de medição não-linear

Considere um sistema de potência constituído por *N* barras e *NL* linhas de transmissão, no qual *m* quantidades são medidas. As variáveis de estado são os módulos e ângulos de fase das tensões nas barras. Como o ângulo da barra de referência é conhecido, o número de variáveis de estado é $n = 2N - 1$. O conjunto de *m* medidas e os erros de medição estão relacionados através do seguinte modelo:

$$\boldsymbol{z} = \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}) + \boldsymbol{\eta} \tag{1}$$

onde **z**, **h**(**x**) e $\boldsymbol{\eta}$ são vetores de dimensão igual a *m* que representam as medidas, as funções não lineares que relacionam quantidades medidas e estados, e os erros de medição, respectivamente. É suposto que o vetor $\boldsymbol{\eta}$ apresenta distribuição normal, com média zero e matriz de covariância **R**.

2.2 Mínimos quadrados ponderados e método de Gauss-Newton

O método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) é tradicionalmente utilizado para fornecer estimativas $\hat{\boldsymbol{x}}$ para os estados. Segundo a abordagem MQP, essa estimativa é calculada de forma a minimizar a função custo baseada no modelo de medição (1). Consequentemente, a seguinte função deve ser minimizada:

$$J(\hat{\boldsymbol{x}}) = [\boldsymbol{z} - \boldsymbol{h}(\hat{\boldsymbol{x}})]^T \, \boldsymbol{R}^{-1} \, [\boldsymbol{z} - \boldsymbol{h}(\hat{\boldsymbol{x}})] \tag{2}$$

A função-objetivo em (2) representa o somatório dos quadrados dos resíduos de estimação $\left(\boldsymbol{r} = \boldsymbol{z} - \boldsymbol{h}(\hat{\hat{\boldsymbol{x}}})\right)$, ponderados pelos inversos das variâncias dos erros de medição. Mostra-se que a solução do problema MQP envolve um procedimento iterativo em que a chamada Equação Normal [2] deve ser resolvida a cada iteração:

$$[\boldsymbol{H}^T(\hat{\boldsymbol{x}}^k) \, \boldsymbol{R}^{-1} \, \boldsymbol{H}(\hat{\boldsymbol{x}}^k)] \, \Delta\hat{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{H}^T(\hat{\boldsymbol{x}}^k) \, \boldsymbol{R}^{-1} \, \Delta\boldsymbol{z} \tag{3}$$

onde **H** é a matriz Jacobiana da função **h**(**x**) calculada no ponto $\hat{\boldsymbol{x}}^k$.

A equação (3) deve ser resolvida tanto para o cojunto de medidas convencionais quanto para as medidas fasoriais. Neste último caso, a baixa penetração de PMUs nas redes elétricas ainda não garante, na maioria das situações práticas, a existência de informação suficiente para se calcular todos os estados da rede elétrica. Diz-se portanto que a rede não é *observável* com respeito às medidas fasoriais. Esta condição real será considerada neste trabalho, isto é, será suposto que as redes elétricas são apenas parcialmente observáveis quando consideradas apenas as medidas fasoriais. O problema da não-observabilidade é contornado com a inclusão de dados adicionais não coletados em tempo real, referidos como informações *a priori*. A técnica de inclusão destes dados é a mesma já utilizada na literatura [12], sendo importante mencionar neste ponto que os efeitos das imprecisões inerentes às informações *a priori* são ao final neutralizados pelas propriedades das técnicas de fusão a serem descritas na sequência.

É importante definir algumas matrizes relacionadas à equação (3) que serão importantes para os métodos propostos neste informe técnico. O termo Matriz Ganho designa a matriz de coeficientes da equação normal, ou seja:

$$\boldsymbol{G}(\hat{\boldsymbol{x}}^k) \; = \; \boldsymbol{H}^T(\hat{\boldsymbol{x}}^k) \, \boldsymbol{R}^{-1} \, \boldsymbol{H}(\hat{\boldsymbol{x}}^k) \tag{4}$$

A partir da matriz ganho, pode-se definir outras duas matrizes relevantes, dadas por:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{P} &= \; (\boldsymbol{H}^T \, \boldsymbol{R}^{-1} \, \boldsymbol{H})^{-1} \\ \boldsymbol{W} &= \boldsymbol{R} - \boldsymbol{H}\boldsymbol{P}\boldsymbol{H}^T \end{aligned} \tag{5}$$

Observa-se que **P** é a inversa da matriz ganho, e representa a matriz de covariância dos erros de estimação enquanto que **W** é a matriz de covariância dos resíduos [2].

2.3 Fusão de estimativas

Além de tornar possível o aproveitamento de estimadores convencionais já existentes, a utilização de um módulo de estimação para cada classe de medida processada também permite trabalhar com estimadores lineares para as medidas fasoriais, já que neste caso as observações disponíves são funções lineares dos estados do sistema. Disto resultam estimadores mais rápidos e eficientes.

A fusão de estimativas tem por objetivo combinar as estimativas geradas pelos estimadores individuais, que processam cada classe de medidas, de tal forma a obter uma estimativa global ótima. Esta combinação é realizada com base em conceitos da fusão de dados com múltiplos sensores. Neste artigo é utilizada uma arquitetura descentralizada [6], [7] segundo a qual são recebidos na célula de fusão apenas resultados produzidos pelos estimadores individuais.

Com base na formulação matemática da fusão de estimativas descentralizada para o caso particular de dois sensores, considerando-se adicionalmente, que as estimativas individuais $\hat{\boldsymbol{x}}_S$ e $\hat{\boldsymbol{x}}_F$ são não correlacionadas, mostra-se que a solução ótima da fusão descentralizada é dada por [4], [6], [12]:

$$\hat{\boldsymbol{x}}^* = \boldsymbol{P_F} \, (\boldsymbol{P_S} + \boldsymbol{P_F})^{-1} \, \hat{\boldsymbol{x}}_S + \boldsymbol{P_S} \, (\boldsymbol{P_S} + \boldsymbol{P_F})^{-1} \, \hat{\boldsymbol{x}}_F \tag{6}$$

Em (6), os subscritos S e F referem-se a vetores e matrizes relacionados às medidas convencionais e fasoriais, respectivamente. As matrizes $\boldsymbol{P_S}$ e $\boldsymbol{P_F}$ são calculadas a partir da inversa das matrizes ganho $\boldsymbol{G_S}$ e $\boldsymbol{G_F}$. Após algumas manipulações algébricas, prova-se que a solução ótima da fusão de estimativas pode ser equivalentemente obtida resolvendo-se o seguinte sistema de equações lineares [6], [7]:

$$(\boldsymbol{G_S} + \boldsymbol{G_F}) \, \hat{\boldsymbol{x}}^* = \; \boldsymbol{G_S}\hat{\boldsymbol{x}}_S + \boldsymbol{G_F}\hat{\boldsymbol{x}}_F \tag{7}$$

Diferentemente de (6), a equação (7) contorna o uso de inversão de matrizes e permite o uso de técnicas de esparsidade para sua solução.

3.0 - PROCESSAMENTO DE ERROS GROSSEIROS

Primeiramente é apresentada a notação utilizada neste trabalho. Como na seção anterior, as quantidades relacionadas ao sistema SCADA são denotadas pelo subscrito S, enquanto que as medidas relacionadas ao sistema fasorial são indicadas pelo subscrito F. Usando A_{XY} como um exemplo genérico da notação adotada, temos que A indica uma variável (vetor ou matriz) calculada para a classe de medidas X a partir de estimativas disponíveis para a classe de medidas Y. Se X=Y, diz-se que a quantidade é *própria*, enquanto que se X≠Y há o cruzamento de informação, e A_{XY} é caracterizada como variável *cruzada*.

3.1 Matrizes de covariância próprias

Serão definidas apenas as matrizes de covariância próprias das quantidades do sistema SCADA, porém o mesmo princípio é válido para as medidas fasoriais sicronizadas:

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{z}}_{SS} &= \boldsymbol{h}_S(\hat{\boldsymbol{x}}_S) \\ \boldsymbol{M}_{SS} &= \boldsymbol{H}_{SS}\boldsymbol{P}_{SS}\boldsymbol{H}_{SS}^T \\ \boldsymbol{W}_{SS} &= \boldsymbol{R}_{SS} - \boldsymbol{M}_{SS} \end{aligned} \tag{8}$$

onde $\hat{\boldsymbol{z}}_{ss}$ é o vetor de estimativas próprias para as medidas do sistema SCADA; $\boldsymbol{M}_{ss}$ é a matriz de covariância das estimativas para as quantidades medidas, lembrando que $\boldsymbol{P}_{ss} = \boldsymbol{G}_{ss}{}^{-1}$; e $\boldsymbol{W}_{ss}$ é a matriz de covariância dos resíduos próprios $(\boldsymbol{r}_{ss} = \boldsymbol{z}_s - \hat{\boldsymbol{z}}_{ss})$ [9].

3.2 Matrizes de covariância cruzadas

Novamente serão apresentadas apenas as matrizes de covariâncias cruzadas da estimativa para medidas SCADA, calculadas a partir dos estados estimados pelo sistema fasorial. A situação oposta não é ilustrada, porém pode ser obtida seguindo a mesma linha de pensamento.

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{z}}_{SF} &= \boldsymbol{h}_S(\hat{\boldsymbol{x}}_F) \\ \boldsymbol{M}_{SF} &= \boldsymbol{H}_{SF}\boldsymbol{P}_{FF}\boldsymbol{H}_{SF}^T \\ \boldsymbol{W}_{SF} &= \boldsymbol{R}_{SS} + \boldsymbol{M}_{SF} \end{aligned} \tag{9}$$

onde $\hat{\boldsymbol{z}}_{sf}$ é o vetor constituído pelas estimativas para as quantidades medidas no sistema SCADA, calculadas a partir dos estados estimados pelo módulo de estimação fasorial $(\hat{\boldsymbol{x}}_f)$; o mesmo raciocínio é válido para a matriz de covariância para a estimativa de medidas $\boldsymbol{M}_{sf}$, e também para $\boldsymbol{W}_{sf}$ que representa a matriz de covariância dos resíduos cruzados $(\boldsymbol{r}_{sf} = \boldsymbol{z}_s - \hat{\boldsymbol{z}}_{sf})$. Sabe-se que $\boldsymbol{H}_{sf} = \partial \boldsymbol{h}_s / \partial \boldsymbol{x}$, é a matriz Jacobiana das medidas convencionais calculada em $\boldsymbol{x} = \hat{\boldsymbol{x}}_f$.

3.3 Métodos de identificação de erros grosseiros

O método clássico do máximo resíduo normalizado, neste trabalho, é utilizado para informações próprias e cruzadas:

$$\begin{aligned} r_{SS}^N(i) &= \frac{|r_{SS}(i)|}{\sqrt{W_{SS}(i,i)}} \\ r_{SF}^N(i) &= \frac{|r_{SF}(i)|}{\sqrt{W_{SF}(i,i)}} \end{aligned} \tag{10}$$

a partir do mesmo princípio é possível calcular $\boldsymbol{r}_{ff}^{\boldsymbol{N}}$ e $\boldsymbol{r}_{fs}^{\boldsymbol{N}}$. Um método de identificação de erros grosseiros alternativo, aplicável tanto para informações próprias quanto cruzadas é o método-$\hat{b}$ [1]:

$$\begin{aligned} \hat{\beta}_{SS}(i) &= \frac{\sigma_{SS}^2(i) r_{SS}^N(i)}{\sqrt{W_{SS}(i,i)}} \\ \hat{b}_{SS}(i) &= \frac{|\hat{\beta}_{SS}(i)|}{\sigma_{SS}(i)} = \frac{\sigma_{SS}(i)|r_{SS}^N(i)|}{\sqrt{W_{SS}(i,i)}} \\ \hat{\beta}_{SF}(i) &= \frac{\sigma_{SS}^2(i) r_{SF}^N(i)}{\sqrt{W_{SF}(i,i)}} \\ \hat{b}_{SF}(i) &= \frac{|\hat{\beta}_{SF}(i)|}{\sigma_{SS}(i)} = \frac{\sigma_{SS}(i)|r_{SF}^N(i)|}{\sqrt{W_{SF}(i,i)}} \end{aligned} \tag{11}$$

o mesmo raciocínio é utilizado para calcular $\hat{\beta}_{ff}$, $\hat{\boldsymbol{b}}_{ff}$, $\hat{\beta}_{fs}$ e $\hat{\boldsymbol{b}}_{fs}$. O último método utilizado na identificação de erros grosseiros é o HTI [11]. Porém, como é utilizado apenas para informações proprias, e considerando ainda as limitações de espaço, sua formulação matemática não é apresentada neste artigo.

3.4 Diagnóstico para erros grosseiros

O diagnóstico é determinado a partir de uma análise sobre a combinação de violações dos limiares adotados para os métodos de detecção/identificação de medidas espúrias. A Tabela 1 sumariza as opções de diagnósticos possíveis, lembrando que SS representa o processamento de apenas medidas convencionais, enquanto que SF e FS indicam o cruzamento de informações.

Tabela 1 – Tabela de Diagnóstico para Presença de Erros Grosseiros

Limites violados			**Diagnóstico**
SS	**SF**	**FS**	
Sim	Sim	Sim	Erro grosseiro em medidas convencionais e fasoriais simultaneamente
Sim	Sim	Não	Erro grosseiro em medidas convencionais (área observável por PMUs)
Sim	Não	-	Erro grosseiro em medidas convencionais (área não observável por PMUs)
Não	Sim	-	Erro grosseiro em medidas fasoriais
Não	Não	-	Nenhum erro grosseiro detectado/identificado

Nota-se que o cruzamento de informações FS se faz necessário para o caso onde os limites de SS e SF são violados, o que possibilita identificar a localização correta da medida contaminada por erro grosseiro.

Após o estágio de detecção/identificação de medidas espúrias, é realizada a recuperação das quantidades identificadas. Essa recuperação obedece os critérios apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Metodologia para Recuperação de Erros Grosseiros

Localização dos Erros Grosseiros	**Método para recuperação**	
	SCADA	**PMU**
Medidas convencionais (área observável por PMUs)	SF	-
Medidas convencionais (área não observável por PMUs)	SS	-
Medidas convencionais e fasoriais simultaneamente	SS	FS
Medidas fasoriais	-	FS

4.0 - RESULTADOS NUMÉRICOS

Neste informe técnico são apresentados os resultados referente ao sistema-teste de médio porte IEEE 118-barras, porém as análises discutidas nesta seção são também amparadas por simulações processadas em outros dois sistemas-teste.

É importante salientar que para geração de valores para cada medida do plano de medição, foram adotados os seguintes níveis de exatidão para os distintos tipos de medida: 3% para injeções e fluxos de potência ativa e reativa, 3% também para as medidas de corrente, e por fim 1% para as quantidades de tensão, sendo todas essas medidas oriundas do sistema SCADA; Para os dados fasoriais são considerados 0,4% para os módulos de tensão e corrente e 0,3% para os ângulos de tensão e corrente. Estes níveis de exatidão são os mesmos para todos os casos estudados neste trabalho.

Outro fato que deve ser destacado são os critérios escolhidos para seleção de medidas suspeitas. Com respeito aos métodos convencionais são utilizados $|\boldsymbol{r}_{ss}^{N}| > 3$ e $|\boldsymbol{r}_{ss}^{N}| > 5$ para o teste dos resíduos normalizados e método HTI, respectivamente. Ainda é fixada uma probabilidade de falso alarme de 1% (α=0,01) para o método HTI. Já para as técnicas que aplicam o cruzamento de informações, é adotado $\left|\boldsymbol{r}_{sf,fs}^{N}\right| > 3$ para o teste dos resíduos normalizados e $\hat{\boldsymbol{b}}_{sf,fs} > 4$ para o método-$\hat{b}$.

Dito isto, são comentados na sequência os índices e métricas empregados na avaliação de desempenho dos métodos abordados neste trabalho.

No estágio detecção/identificação são avaliados para cada método: a eficácia para detectar e identificar todas as medidas espúrias do plano de medição, o número de vezes em que é necessário estimar novamente os estados do sistema durante o processo de recuperação das medidas e o esforço computacional de cada método, fundamentado no tempo total de processamento. Finalmente, também é avaliado o índice de espalhamento de erro (IEsp) que indica a porcentagem de medidas válidas declaradas como suspeitas de serem portadoras de erro grosseiro. Este índice é calculado pela relação entre a quantidade de medidas válidas rotuladas como suspeitas e o número total de medidas que constituem o plano de medição.

Para a etapa final do processo de estimação de estados, utiliza-se a média dos erros e desvio padrão dos módulos e ângulos das tensões nas barras do sistema a fim de avaliar a qualidade das estimativas finais. Além disso, também é usada a seguinte métrica de precisão da tensão complexa:

$$\boldsymbol{M}_{acc_V} = \left\|\dot{\boldsymbol{V}}^{erro}\right\|_2 = \left(\sum_j \left|\dot{\boldsymbol{V}}_j^{verd} - \dot{\boldsymbol{V}}_j^{est}\right|^2\right)^{\frac{1}{2}} \tag{12}$$

onde $\dot{\boldsymbol{V}}_j^{verd}$ e $\dot{\boldsymbol{V}}_j^{est}$ são os fasores das tensões nodais na j-ésima barra "verdadeiras" (obtidas via fluxo de potência) e estimadas, respectivamente.

Todos os casos apresentados a seguir foram simulados em ambiente *Matlab*, em computador com processador *Intel Core i5*, 4ª geração, 1.7GHz e memória de 6GB.

4.1 IEEE 118-barras

O sistema-teste é formado por 118 barras e 179 linhas de transmissão, e como já mencionado, é considerado a observabilidade integral somente com relação às medidas convencionais. A composição dos planos de medição são descritos a seguir. SCADA: 72 medidas de injeção de potência, tomadas aos pares ativo/reativo; 67 medidas de magnitude de tensão; 116 medidas de fluxo de potência, também tomadas aos pares ativo/reativo, totalizando 443 medidas. PMU: 35 medidas de tensão complexa das barras (módulo e fase); 31 medidas de corrente nos ramos (parte real e imaginária), onde somadas resultam em 132 medidas.

Para este sistema-teste são analisadas as seguintes situações: nos casos 1.A e 1.B apenas uma medida SCADA é contaminada por erro grosseiro, sendo que no primeiro cenário a medida está situada na área observável por PMUs, enquanto que na segunda situação a medida está localizada fora da área observável por PMUs. O caso 2.A ilustra a presença de cinco medidas convencionais portadoras de erro grosseiro, onde todas elas estão contidas na área observável por PMUs. No caso 2.B, existem quatro medidas espúrias no plano de medição SCADA, dentre elas, apenas uma medida está situada fora da área observável por PMUs. Já os eventos 3.A e 3.B apresentam uma e quatro medidas espúrias no plano de medição fasorial, respectivamente. A magnitude destes erros simulados variam entre 5σ e 30σ.

A Tabela 3 exemplifica uma situação individual para cada um dos casos estudados, onde são apresentadas as quantidades de erros grosseiros simulados em cada cenário, e também o número de medidas declaradas como suspeitas por cada um dos métodos avaliados. Nota-se que os resultados para o método-$\hat{b}$ não são ilustrados, pois sua aplicação restringe-se à medida que apresenta maior resíduo normalizado, independendo portanto do refinamento de um conjunto pré-selecionado de medidas suspeitas.

Tabela 3 – Erros Grosseiros Simulados e Seleção de Medidas Suspeitas

Caso	**Nº de Erros grosseiros**	**Método**			
		$\boldsymbol{r^N}$	**HTI**	$\boldsymbol{r^N_{cruz}}$	$\boldsymbol{\hat{b}_{cruz}}$
1.A	1	9	5	1	1
1.B	1	2	2	0	0
2.A	5	15	7	5	5
2.B	4	9	5	3	3
3.A	1	0	0	1	1
3.B	4	0	0	4	4

Os valores exibidos na Tabela 3 apontam uma dentre as grandes vantagens obtidas ao utilizar as técnicas que fazem o uso do cruzamento de informações. Estas se mostram bem sensíveis à presença de medidas espúrias independentemente da amplitude do erro, o que contrasta com os métodos convencionais. Além disso, o cruzamento de informações impede que medidas válidas sejam flagradas como suspeitas, contribuindo significativamente para reduzir o valor do índice IEsp. Estas propriedades são justificadas pela independência estatística entra as duas classes de medidas.

Entretanto, outra circunstância relevante é observada para os casos 1.B e 2.B, que evidenciam a fragilidade destas técnicas quando os erros em medidas convencionais se encontram fora da zona observável por PMUs. O contrário não ocorre pelo fato do sistema ser integralmente observável com respeito às medidas SCADA. Essa fragilidade indica a importância de se combinar métodos convencionais com os que utilizam o cruzamento de informações.

Esses problemas não foram encontrados em simulações onde o sistema-teste é considerado observável para ambas as classes de medidas, porém esta situação não é, pelo menos por enquanto, condizente com a realidade. Logo, a proposta é utilizar métodos convencionais para auxiliar o cruzamento de informações na falta de observabilidade de medidas fasoriais.

Na sequência, a Tabela 4 mostra os valores encontrados para alguns índices de desempenho dos métodos no estágio de identificação e recuperação de medidas contaminadas. Por limitações de espaço, são apresentadas apenas as médias para todos os casos. Para avaliar o número de reestimações necessárias, desconsideram-se as simulações das situações 1.A e 1.B, uma vez que ambos possuem apenas uma medida contaminada. Adicionalmente, os resultados dos cenários 3.A e 3.B são considerados apenas para as técnicas que aplicam o cruzamento de informações. Por fim, para o cálculo da média dos valores que representam o índice de eficácia (IEfic), não são computados as quantidades dos casos 3.A e 3.B para os métodos convencionais, e da mesma maneira, os produtos das suposições 1.B e 2.B não são considerados para o cruzamento de informações.

Tabela 4 – Média dos Índices de Desempenho Detecção/Identificação

Índice	**Método**				
	$\boldsymbol{r^N}$	$\boldsymbol{\hat{b}}$	**HTI**	$\boldsymbol{r^N_{cruz}}$	$\boldsymbol{\hat{b}_{cruz}}$
IEsp (%)	1,41	-	0,52	0	0
IEfic (%)	84,75	91,75	95	100	100
Número de Reestimações	4,11	4,32	1	1	1
Tempo Computacional (s)	0,43	0,29	0,28	0,21	0,23

Os valores do índice de IEsp reportados na Tabela 4 consideram distintos casos coletivamente, mas mesmo assim são reveladores quanto ao desempenho dos diferentes métodos. Ressalta-se que estes valores são normalizados pela dimensão do plano de medição (443 medidas neste caso). O valor do índice de espalhamento de erro para o método-$\hat{b}$ não é indicado na Tabela 4 pelo mesmo motivo já discutido anteriormente.

Nota-se que o método-$\hat{b}$ e o teste do maior resíduo normalizado necessitam de um maior número de estimações para recuperarem as medidas espúrias. Isso se justifica pela grande diferença quando comparados ao restante dos métodos avaliados. Estes últimos são capazes de recuperar todas as medidas flagradas como errôneas simultaneamente, enquanto as duas primeiras estratégias realizam essa recuperação de maneira sequencial, ou seja, recuperam uma medida espúria por vez. O fato do método-$\hat{b}$ apresentar um número de estimações maior quando comparado com o teste dos resíduos normalizados é devido à maior sensibilidade à presença de erros (maior IEfic), o que o torna capaz de identificar e recuperar um número superior de medidas.

Os resultados apresentados nas Tabelas 3 e 4 são representativos de diversos outros obtidos com o auxílio de outros dois sistemas-teste. Em geral, os resultados consistentemente indicam que a melhor combinação para todo o processo de estimação de estados envolve o método HTI e alguma das duas estratégias que utilizam o cruzamento de informações (já que, também consistentemente, estes últimos apresentam resultados bem similares). Uma característica em comum destes métodos é a já comentada possibilidade de realizar a identificação e recuperação das medidas espúrias em bloco, necessitando apenas uma iteração.

Esta combinação permite realizar o processamento de erros grosseiros para cada módulo de estimação e obter estimativas confiáveis, antes de enviá-las à célula de fusão que determina a estimativa final.

Como forma de validação desta última etapa, a Tabela 5 exibe as métricas de tensão após a fusão das estimativas convencionais e fasoriais. Para os valores ilustrados a seguir, foram considerados apenas as quantidades obtidas pela combinação dos métodos HTI e resíduo normalizado cruzado.

Tabela 5 – Métricas para Estimativa Final

Caso	$\boldsymbol{M_{acc_V}}$	**Média dos Erros**		**Média dos Desvios-padrão**	
		$\boldsymbol{\lvert V \rvert}$	**δ**	$\boldsymbol{\lvert V \rvert}$	**δ**
1.A	$6{,}72e^{-2}$	$6e^{-4}$	$4e^{-4}$	$7{,}77e^{-4}$	$4{,}17e^{-4}$
1.B	$6{,}65e^{-2}$	$6e^{-4}$	$4e^{-4}$	$7{,}74e^{-4}$	$4{,}22e^{-4}$
2.A	$6{,}5e^{-2}$	$6e^{-4}$	$4e^{-4}$	$7{,}76e^{-4}$	$4{,}22e^{-4}$
2.B	$6{,}75e^{-2}$	$6e^{-4}$	$4e^{-4}$	$7{,}84e^{-4}$	$4{,}28e^{-4}$
3.A	$6{,}39e^{-2}$	$5e^{-4}$	$4e^{-4}$	$7{,}65e^{-4}$	$4{,}22e^{-4}$
3.B	$7{,}15e^{-2}$	$6e^{-4}$	$5e^{-4}$	$7{,}87e^{-4}$	$4{,}11e^{-4}$
4	$7{,}36e^{-2}$	$6e^{-4}$	$5e^{-4}$	$8e^{-4}$	$4{,}42e^{-4}$

O caso 4 foi adicionado apenas nesta tabela por se tratar de um caso específico, onde há a presença de erros grosseiros nas duas classes de medidas simultaneamente. Esse caso foi inserido para avaliar a qualidade das estimativas finais mesmo para o cenário mais crítico. O procedimento adotado neste caso consiste em primeiramente identificar e corrigir as medidas convencionais através do método HTI. Após essa correção, é efetuada a recuperação via cruzamento de informações (FS).

Todos os valores apresentados e analisados nesta seção são um indicativo de que a técnica do cruzamento de informações combinada com um método convencional para o processo de estimação de estados, é capaz de

identificar e recuperar os erros grosseiros presentes nos planos de medição, o que possibilita o aproveitamento dos benefícios da inclusão de medidas fasoriais no sistema elétrico de potência. Esta inclusão proporciona assim um significativo aperfeiçoamento do processo de estimação de estados, tornando-o ainda mais eficaz e confiável.

5.0 - CONCLUSÕES

Os resultados dos estudos de caso apresentados neste artigo, que são representativos de diversos estudos de caso realizados também com o auxílio de outros sistemas-teste do IEEE, permitem concluir que mesmo considerando-se a inclusão gradual de PMUs no sistema de potência, os benefícios das medidas fasoriais podem ser vantajosamente estendidos à estimação de estados. Mesmo que o sistema ainda não seja observável por medidas fasoriais, as técnicas apresentadas neste artigo demonstram a possibilidade de depurar as estimativas finais dos estados do sistema mediante um processamento mais eficaz de erros grosseiros em medidas. Fatores tais como: inclusão de informações *a priori* para contornar o problema de observabilidade; utilização do cruzamento de informações para melhorar a precisão e agilidade da identificação de EG, e combinação destes métodos com os convencionais, possibilitam o processamento de erros grosseiros para diferentes casos, incluindo aqueles em que se verifica a presença de EG nas duas classes de medidas. Os resultados apontam que, para um melhor desempenho, devem ser combinados o cruzamento de informações com o método HTI. Após essa etapa, a metodologia proposta pode ser então concluída mediante o estágio final de fusão de estimativas.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] MONTICELLI, A. Power system state estimation: a generalized approach. Norwell, MA, USA: Kluwer, 1999.

[2] ABUR, A.; GÓMEZ-EXPÓSITO, A. Power system state estimation: theory and implementation. New York, NY, USA: Marcel Decker, 2004.

[3] PHADKE, A. G.; THORP, J. S. Synchronized phasor measurements and their applications. New York, NY, USA: Springer Science & Business Media, 2008.

[4] ZHOU, M. et al. An alternative for including phasor measurements in state estimators. IEEE Transactions on Power Systems, IEEE, v. 21, n. 4, p. 1930-1936, 2006.

[5] NUQUI, R. F.; PHADKE, A. G. Hybrid linear state estimation utilizing synchronized phasor measurements. In: IEEE Power Tech. Lausanne, Switzerland: IEEE , Jul. 2007.

[6] SIMÕES COSTA, A.; ALBUQUERQUE, A. Inclusão de medições fasoriais na estimação de estados com preservação da estrutura dos estimadores convencionais. In: XXI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE). Florianópolis, Brasil: SNPTEE, Out. 2011.

[7] SIMÕES COSTA, A.; ALBUQUERQUE, A.; BEZ, D. An estimation fusion method for including phasor measurements into power system real-time modeling. IEEE Transactions on Power Systems, IEEE, v. 28, n. 2, p. 1910-1920, 2013.

[8] PHADKE, A. et al. Recent developments in state estimation with phasor measurements. In: Power Systems Conference and Exposition (PSCE). Seattle, WA, USA: IEEE/PES, Mar. 2009.

[9] COUTTO FILHO, M. B. d.; STACCHINI DE SOUZA, J. C.; RIBEIRO GUIMARAENS, M. A. Enhanced bad data processing by phasor-aided state estimation. IEEE Transactions on Power Systems, IEEE, v. 29, n. 5, p. 2200-2209, 2014.

[10] SCHWEPPE, F. C.; WILDES, J. Power System static-state estimation, part [i]: exact model. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems (PAS), IEEE, n. 1, p. 120-125, 1970.

[11] MILI, L.; VAN CUTSEM, T.; RIBBENS-PAVELL, M. Hypothesis testing identification: a new method for bad data analysis in power system state estimation. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems (PAS), IEEE, v. 103, n. 11, p. 3239-3252, 1984.

[12] EDER, C. J. F.; SIMÕES COSTA, A. J. A. Métodos de fusão para agregar múltiplas classes de dados à estimação de estados de redes elétricas. In: Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática (CBA). Belo Horizonte, MG, Brasil: SBA, Set. 2014.

[13] KEMA. Metrics for determining the impact of phasor measurements on power system state estimation. [S.l.]: Eastern Interconnection Phasor Project, 2006.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

	Antonio José Alves Simões Costa nasceu em 1950 na cidade de Belém, estado do Pará. É engenheiro eletricista, graduado pela UFPA (Belém, PA) no ano de 1973. Obteve o grau de mestre em ciências pela UFSC (Florianópolis, SC) em 1975. E em 1981, conclui o Ph.D. em engenharia elétrica pela *University of Waterloo* (Canadá). Atualmente é professor titular do departamento de engenharia elétrica da UFSC, *Fellow* do IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*), além de ser editor associado do periódico *Electric Power System Research.* Tem publicações nos seguintes periódicos: IEEE *Transactions on Power Systems*; IEEE *Transactions on Smart Grid*; Eletroevolução; *International Journal of Control, Automation, and Electrical Systems* (SBA); IEEE *Transactions on Power Apparatus and Systems*; entre outros.. Seu interesse em pesquisa contempla atualmente as seguintes áreas: modelagem em tempo real de sistemas elétricos de potência; estimação de estados em sistemas de potência; dinâmica e controle de sistemas de potência; controle e operação de microrredes
	Rodolfo Mussiato Gonçalves nasceu em 1990 na cidade de Maringá, estado do Paraná. É engenheiro eletricista, graduado pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), campus de Foz do Iguaçu, no ano de 2013. Obteve grau de mestre em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em 2016. Atualmente sua pesquisa concentra-se na área de sistemas elétricos de potência, com ênfase em tópicos relacionados à modelagem e operação em tempo real de sistemas elétricos de potência, e estimação de estados em sistemas de potência.