

Impacto da Hipótese de Independência dos Erros no Processo de Estimação de Estado

Lais C. Oliveira* Vitor H. P. Melo* Renato Oliveira*
João Bosco A. London Jr.*

* *Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP (e-mail: laisc.oliv@usp.br, vitorhpmelo@usp.br, renato.oliveira1985@usp.br, jbalj@sc.usp.br)*

Abstract: The state estimation process is fundamental for the real-time operation of electric power systems (EPSs), since the estimated values of the state variables are the basis for the execution of functions related to real-time monitoring of EPSs. In the traditional modeling of the state estimation process in EPSs, it is assumed the hypothesis that the measurements available for estimation have independent random errors. However, because the measurements are the result of processing signals from several sensors, and several measurements may share signals from the same sensors, that hypothesis is not valid. Given the above, this paper has two objectives: (i) to analyze the procedure for obtaining measurements from sensor signals; and (ii) to investigate the influence of the sharing of sensor signals in the traditional process of state estimation in EPSs. For this, this study uses the weighted least squares state estimator, associated with the largest normalized residual test, as they are the estimator and the technique for gross errors processing most used in practice and most studied in academia. The influence of the hypothesis that the measurement errors are independent was evaluated from the perspective of the accuracy of the estimates obtained and the handling of gross errors.

Resumo: O processo de estimação de estado é de fundamental importância para operação em tempo real de sistemas elétricos de potência (SEPs), pois os valores estimados das variáveis de estado são a base para execução de funções relacionadas ao monitoramento em tempo real desses sistemas. Na modelagem tradicional do processo de estimação em SEPs, assume-se a hipótese de as medidas disponíveis para estimação possuírem erros aleatórios independentes. Entretanto, em função de as medidas serem o resultado do processamento de sinais provenientes de diversos sensores, podendo diversas medidas compartilharem sinais oriundos dos mesmos sensores, a hipótese de os erros das medidas serem independentes não é válida. Face ao exposto, são dois os objetivos deste trabalho: (i) analisar o processo de medição e composição de medidas a partir das informações dos sensores; e (ii) investigar a influência do compartilhamento de sinais de sensores, no processo tradicional de estimação de estado em SEPs. Para isso, foi utilizado o estimador de estado por mínimos quadrados ponderados, associado ao teste do maior resíduo normalizado, em função de ser o estimador e a técnica para processamento de erro grosseiro mais empregados na prática e mais estudados na academia. A influência da hipótese de os erros das medidas serem independentes foi avaliada na perspectiva da exatidão das estimativas obtidas e processamento de erros grosseiros.

Keywords: Dependent measurements; Errors on sensor; State estimation; Gross errors processing.

Palavras-chaves: Dependência de medidas; Erros em sensores; Estimação de estado; Processamento de erro grosseiro.

1. INTRODUÇÃO

O processo de Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência (EESEP) vem sendo foco de inúmeras pesquisas desde o final da década de 1960 (Schweppe and Wildes, 1970) e já se consolidou como uma ferramenta fundamental para modelagem em tempo real de redes elétricas (Wu, 1990; Balu et al., 1992; Monticelli, 2000; Bretas et al., 2021).

Entretanto, em função do desenvolvimento de novos equipamentos e dispositivos elétricos associados às chamadas Smart Grids (surgimento de novas tecnologias de medição em tempo real, com tempos de amostragem superiores aos dos tradicionais sistemas SCADA, novas arquiteturas de redes elétricas com capacidade de operar autonomamente, penetração de novas fontes de energia renováveis, etc.), os paradigmas da operação de Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) se expandem e exigem que o processo de EESEP

evolua para se manter em sintonia com as novas tendências.

Face ao exposto, pesquisas recentes têm sido desenvolvidas para possibilitar a evolução do processo de EESEP frente aos desenvolvimentos recentes da área, focando no aumento da exatidão das estimativas obtidas. Nesse contexto destacam-se, por exemplo, a proposição de estimadores de estado com a capacidade de processar medidas com taxas de amostragem variadas, provindas de diversas fontes, como, por exemplo, o sistema SCADA, medidores inteligentes e unidades de medição fasorial (Massignan et al., 2021).

Apesar do desenvolvimento de novos equipamentos e dispositivos elétricos, bem como da proposição de novas técnicas para tratamento do processo de EESEP, a grande maioria dos estimadores de estado propostos se baseiam na hipótese de os erros das medidas, inerentes ao processo de telemedição, serem variáveis aleatórias independentes. Porém, tendo em vista que um sistema de medição compartilha sensores/sinais para composição de medidas, ao admitir a independência entre os erros de medidas pode haver comprometimento da acurácia do processo de EESEP e da identificação de medidas contaminadas com Erros Grosseiros (EGs) (Caro et al., 2011). Isto ocorre independentemente da utilização de medidas convencionais do sistema SCADA ou de medidas fasoriais sincronizadas. Pois a formulação do problema é construída com base em uma hipótese não verdadeira.

Importa destacar que a partir de uma análise da estrutura do sistema de medição, Caro et al. (2009) relacionaram as medidas fornecidas ao estimador com os sensores responsáveis pela medição das grandezas elétricas. Dessa forma, propuseram uma matriz de covariância dos erros das medidas não diagonal, para refletir o fato de, em função dos sensores compartilhados pelas medidas, os erros de medidas são variáveis aleatórias dependentes. Outros estudos seguiram também nessa linha (Caro et al., 2010; Muscas et al., 2013; Caro and Valverde, 2013; Pau et al., 2014; Choi and Xie, 2014). Ademais, outras abordagens têm sido estudadas para considerar uma nova modelagem do processo de EESEP, considerando diretamente as grandezas elétricas disponibilizadas pelos sensores (Dobakhshari et al., 2019; Jovicic and Hug, 2020; Dobakhshari et al., 2021).

No entanto, poucos trabalhos retratam com clareza a propagação de erro e a perda da exatidão das estimativas obtidas a partir da utilização de estimadores de estado baseados na hipótese de independência dos erros das medidas. Isto posto, o presente trabalho aborda de forma sistemática o processo de EESEP, desde a aquisição de sinais através do sistema SCADA e de Unidades Terminais Remotas (UTRs), visando explorar a infraestrutura presente no sistema de medição, até a estimação de estado e o processamento de EGs. De forma mais específica, os objetivos deste trabalho são os seguintes: (i) analisar o processo de medição e composição de medidas a partir das informações dos sensores; e (ii) investigar a influência do compartilhamento de sinais de sensores, no processo tradicional de estimação de estado em SEPs. Para isso, será utilizado o estimador de estado por mínimos quadrados ponderados (WLS, do inglês *Weighted Least Squares*), as-

sociado ao teste do maior resíduo normalizado, em função de ser o estimador e a técnica para processamento de EGs mais empregados na prática e mais estudados na academia. A influência da hipótese de os erros das medidas serem independentes será avaliada na perspectiva da exatidão das estimativas obtidas e processamento de EGs.

O artigo está estruturado da seguinte forma: na seção 2 é apresentada a estrutura de um sistema de medição, até a disponibilização das medidas nos centros de operação; na seção 3 aborda-se a modelagem clássica do processo de EESEP, com base no estimador WLS e na técnica do maior resíduo normalizado; na seção 4 é apresentada a sistemática de avaliação aplicada aos estudos de caso; e na seção 5 temos os principais resultados obtidos. Por fim, a seção 6 encerra o trabalho com as conclusões obtidas.

2. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE MEDIDAS

O sistema elétrico ao longo dos anos passou por muitas modernizações e atualmente é predominantemente monitorado e automatizado com o objetivo de manter o equilíbrio entre geração e demanda de energia, bem como garantir a confiabilidade da rede (Arghira et al., 2011).

À vista disso, emprega-se o sistema SCADA, tecnologia predominante nas subestações, para viabilizar a disponibilização de medições em tempo real nos centros de monitoramento e controle. Desta maneira, a Figura 1 apresenta a estrutura básica da comunicação entre a rede e o centro operação.

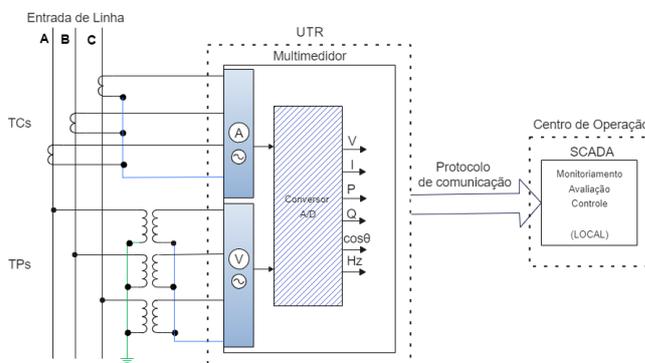


Figura 1. Processamento de Medidas pelo SCADA

A partir da Figura 1 é possível constatar a necessidade do acoplamento de diversos dispositivos para aquisição, conversão, leitura e transmissão dos sinais de medição até que chegue aos centros de operação, e consequentemente a existência de dependência entre as medidas processadas e os sensores.

Ressalta-se, que mesmo aplicando uma pré-filtragem de erros discrepantes, nas medições, os sinais estão sujeitos a ruídos inerentes ao processo. Desta forma, define-se o modelo de medição através da equação (1):

$$z = z^V + e, \quad (1)$$

onde, z é o vetor das medidas analógicas processadas, z^V é o vetor com valores verdadeiros dessas medidas (valores

desconhecidos) e e o vetor de erros (ou ruídos) aleatórios dessas medidas.

Devido ao elevado valor de corrente e tensão nas linhas de transmissão, faz-se necessário o uso dos Transformadores de Potencial (TPs) e Transformadores de Corrente (TCs), para adequar de forma proporcional os valores do seu secundário aos equipamentos de proteção, controle e medição. A etapa seguinte consiste na entrega das grandezas analógicas aos Multimetroes (MMs), estes por sua vez empregam um conversor analógico/digital para obter grandezas derivadas: potência ativa e potência reativa; fator de potência; frequência; tensão; e corrente. Evidencia-se aqui que os MMs não têm funcionalidades de armazenamento de registros de medição de forma periódica.

Isto posto, as informações chegam até as principais componentes do SCADA, as UTRs, que coletam dados automaticamente sendo conectadas diretamente aos sensores, medidores, registradores ou equipamentos de processo. Subsequentemente as UTRs localizadas na subestação processam os sinais e encaminham via protocolo para o SCADA e este por sua vez supervisiona, controla, otimiza e gerencia o sistema elétrico, mediante aos centros de operação local ou remotos (Kezunovi et al., 2005; Arghira et al., 2011).

Por sua vez, os centros de controle reúnem uma grande quantidade de dados, que são armazenados em servidores locais/remotos e usados para inúmeros fins (Wu et al., 2005). Além disso, o centro de controle recebe as informações digitais e promove a Interface Homem Máquina (IHM), adotadas na maioria dos centros de operação, para monitoramento e intervenção em tempo real. Sendo estas apresentadas em forma de diagrama unifilar, com uma equivalência monofásica para melhor entendimento e gerenciamento da energia no sistema supervisionado.

Vale enfatizar que apesar de o centro de controle central ter uma visão mediante a um equivalente monofásico, as informações de cada fase são processados pelos MMs, conforme evidenciado em seus manuais. E estes dados podem ser acessados pelo centro de controle local, permitindo também o armazenamento em um servidor específico, no entanto, estas funcionalidades não são usadas atualmente.

3. ESTIMAÇÃO DE ESTADO E PROCESSAMENTO DE ERROS GROSSEIROS

Tendo em vista que os valores verdadeiros das variáveis de estado de um SEP não são conhecidos, consequentemente os valores verdadeiros das medidas são também desconhecidos. Dessa forma, para estimar as variáveis de estado é necessário fazer certas suposições sobre o modelo de medição apresentado na equação (1).

No processo de ESEEP convencional supõe-se, então, que o vetor de erros aleatórios das medidas apresenta distribuição Gaussiana, com média zero ($E(e) = 0$) e matriz de covariância $R(E(e.e^T) = R)$ e que os erros são não correlacionados. Dessa forma, a matriz R é suposta diagonal, conforme ilustrado na equação (2).

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & 0 \\ & \sigma_2^2 & & \\ & & \dots & \\ 0 & & & \sigma_i^2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

em que σ_i^2 é a variância esperada para a medida i .

Os σ_i^2 s são usualmente expressos como uma função da precisão percentual do medidor (pr_i) e do valor medido (z_i), conforme ilustrado na equação (3).

$$\sigma_i = \frac{|z_i| \cdot pr_i}{3}, \quad (3)$$

A partir dessas suposições, o modelo de medição pode ser reescrito conforme apresentado na equação (4).

$$z = h(x) + e, \quad (4)$$

onde, x é o vetor das variáveis de estado (usualmente as tensões complexas nodais), $h(\cdot)$ é o vetor de funções lineares e/ou não-lineares (dependendo do tipo de medida) que relaciona as quantidades medidas e as variáveis de estado.

Em razão das boas características de convergência, da razoável eficiência computacional e da facilidade de implementação, o estimador WLS monofásico é tradicionalmente empregado, juntamente com a técnica do maior resíduo normalizado para detecção, identificação e eliminação de medidas com EGs. Ao fazer uso destas ferramentas, adota-se as seguintes premissas: i) as cargas do sistema trifásico são distribuídas de forma balanceada, ii) as redes são simétricas, e iii) as grandezas são de sequência positiva.

3.1 Estimador de Estado WLS

Conforme apresentado por Schweppe and Wildes (1970), a melhor estimativa do vetor das variáveis de estado é obtida calculando o valor de x que torna mínimo o índice $J(x)$, conforme apresentado pela equação (5).

$$J(x) = [z - h(x)]^T \cdot R^{-1} \cdot [z - h(x)], \quad (5)$$

O objetivo da ponderação, através da matriz R^{-1} , é “atribuir mais confiança” às medidas mais precisas, i.e., com menor variância.

Em razão de $J(x)$ ser uma função quadrática não linear, é necessário adotar um processo iterativo para estimação das variáveis de estado \hat{x} e assim a atualização de x é feita a cada iteração k , conforme apresentado em (6).

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k, \quad (6)$$

sendo Δx^k dado pela equação (7), conhecida como equação normal.

$$\Delta x^k = [H(x^k)^T \cdot R^{-1} \cdot H(x^k)]^{-1} \cdot H(x^k)^T \cdot R^{-1} \cdot (z - h(x^k)), \quad (7)$$

onde $H(x^k)$ é a matriz das primeiras derivadas das funções não lineares do vetor $h(x^k)$, conhecida como matriz Jacobiana do estimador WLS.

O processo iterativo finaliza quando o erro de uma iteração a outra está abaixo de uma tolerância (ε) pré-determinada:

$$\text{Max } |\Delta x^k| \leq \varepsilon. \quad (8)$$

3.2 Identificação de Medidas Portadoras de EGs

Nesta etapa empregasse, usualmente, uma análise estatística dos resíduos das medidas, com intuito de verificar a existência e identificação de medidas portadoras de EGs (Monticelli and Garcia, 1983; Abur and Exposito, 2004). Posto isto, a técnica mais usual e conhecida na literatura é o teste do Maior Resíduo Normalizado (r^{nMax}), e por esse motivo será considerado neste estudo.

Os resíduos normalizados são obtidos mediante a aplicação da equação (9).

$$r_i^n = \frac{r_i}{\sqrt{\Omega_{ii}(\hat{x})}}, \quad (9)$$

sendo r_i o resíduo da medida i e Ω_{ii} o i -ésimo elemento da diagonal da matriz de covariância dos resíduos de estimação ($\Omega(\hat{x}) = R - H(\hat{x}) \cdot [H(\hat{x})^T \cdot R^{-1} \cdot H(\hat{x})]^{-1} \cdot H^T(\hat{x})$).

Após a obtenção do vetor dos resíduos normalizados, seleciona-se o maior elemento desse vetor, em módulo ($|r_i^{nMAX}|$), e aplica-se o seguinte teste:

$$\text{Se } |r_i^{nMAX}| > \alpha, \quad (10)$$

então a medida i é suspeita de possuir EG e deve ser eliminada do conjunto de medidas para que uma nova estimativa seja realizada sem a sua influência. Caso contrário, não há suspeita de existência de EG. O limiar α é usualmente considerado igual a 3 (Bretas et al., 2021).

De forma geral, os EGs podem ser classificados como erros simples, quando apenas uma medida é portadora de EG, ou EGs múltiplos, quando mais de uma medida possui EG. Mediante a isso, os EGs múltiplos podem ser subdivididos em não-interativos ou interativos e ainda podem ser conformativos, ou seja, ter seus erros "mascarados" (Van Cutsem et al., 1984; Abur and Exposito, 2004; Bretas et al., 2021).

4. SISTEMÁTICA DE AVALIAÇÃO

As análises realizadas neste estudo têm por objetivo verificar o comportamento e propagação dos erros, desde a aquisição de medidas pelos transdutores (TPs e TCs) até o processamento de EGs, utilizando o estimador de estado WLS associado ao teste do maior resíduo normalizado.

A sistemática de avaliação adota um algoritmo gerador de medidas trifásicas que serão processadas por um estimador, a partir de valores das variáveis elétricas medidas pelos sensores, conforme procedimento proposto por Caro et al. (2009). Para emular em laboratório os valores das medidas dos sensores, este estudo considerou duas redes simétricas e equilibradas, que serão apresentadas na próxima seção, sendo suas grandezas de sequência positiva obtidas pelo fluxo de potência.

Os valores obtidos pelo fluxo de potência serão considerados os valores de referência para as variáveis de estado das

redes analisadas e também para as medidas dos sensores. A partir desses valores de referência, simulam-se cenários de medição com a presença de ruídos aleatórios independentes com distribuição normal de média zero e desvio padrão das grandezas elétricas monitoradas pelos sensores, a cada sinal de entrada dos MMs, conforme a expressão (11).

$$\begin{aligned} V^f &= V_{\text{Ref}}^f + N(0, \sigma_V) \\ I^f &= I_{\text{Ref}}^f + N(0, \sigma_I) \quad \forall f \in \{A, B, C\}, \\ \varphi^f &= \varphi_{\text{Ref}}^f + N(0, \sigma_\varphi) \end{aligned} \quad (11)$$

onde: V^f, I^f e φ^f correspondem, respectivamente, aos sinais (medidas dos sensores) de magnitude de tensão, magnitude corrente e ângulo de defasagem entre tensão e corrente (grandezas de fase); e $V_{\text{Ref}}^f, I_{\text{Ref}}^f$ e φ_{Ref}^f são os respectivos valores de referência. Os desvios padrão das medidas dos sensores (σ_V, σ_I , e σ_φ) são calculados de acordo com a equação (3), trocando z_i por z_i^{fc} (valor obtido pelo fluxo de carga).

Após a aquisição dos sinais (medidas dos sensores) são obtidos os valores das medidas que serão transferidos ao processo de ESEEP, a partir do seguinte conjunto de expressões (12):

$$\begin{aligned} V_i &= \frac{V_i^A + V_i^B + V_i^C}{3} \\ P_i &= \frac{1}{3} \sum_{f=\{A,B,C\}} V_i^f I_i^f \cos(\psi_i^f) \\ Q_i &= \frac{1}{3} \sum_{f=\{A,B,C\}} V_i^f I_i^f \sin(\psi_i^f) \\ P_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{f=\{A,B,C\}} V_i^f I_{ij}^f \cos(\psi_{ij}^f) \\ Q_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{f=\{A,B,C\}} V_i^f I_{ij}^f \sin(\psi_{ij}^f) \end{aligned} \quad (12)$$

onde: V_i, P_i, Q_i são, respectivamente, as medidas de amplitude de tensão, potência ativa e potência reativa na barra i ; e P_{ij} e Q_{ij} são as medidas de potência ativa e reativa, respectivamente, no ramo entre as barras i e j (da barra i para barra j).

Na sistemática de avaliação desenvolvida o cálculo de fluxo de potência é realizado através do MATPOWER e os demais procedimentos e técnicas (inserção de ruído aleatório, estimador WLS e teste do maior resíduo normalizado) foram implementados em MATLAB.

A Figura 2 expõe, em síntese, a sistemática aplicada. Os blocos destacados em verde sinalizam as etapas relacionadas à aquisição dos dados adotados como referência, na cor vermelha destaca-se a inserção de ruídos ou EGs, e na cor azul são destacadas as etapas de processamento, aquisição, estimação de estado e processamento de EGs.

Além do mencionado, aplica-se (3) com uma precisão de 0,01 para os sensores de corrente/tensão para obter o desvio padrão considerado para inserção dos ruídos. E para obter a matriz variância (2) adota-se (3) com precisão de 0,01 para medidas de tensão e 0,02 para medidas de potência, conforme considerado usualmente na literatura.

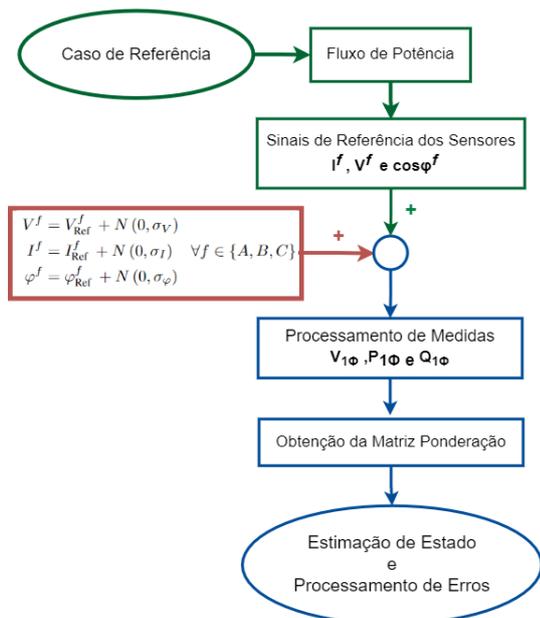


Figura 2. Fluxograma da sistemática de avaliação aplicada

Neste artigo a sistemática de avaliação será aplicada em dois sistemas de teste: i) o sistema teste de 2 barras, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 1 considerando o sistema de medição ilustrado na Figura 3; e ii) o sistema teste do IEEE de 14 barras, exibido na Figura 4.

5. RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

5.1 Sistema 2 Barras

Este primeiro estudo de caso tem como objetivo avaliar o comportamento das medidas a serem fornecidas ao estimador de estado a partir de ruídos e EGs provenientes de sensores. Logo, para fins didáticos, adota-se um sistema simples de 2 barras. Os dados de referência e parâmetros do sistema são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de Referência para as Medidas dos sensores e Parâmetros - Sistema teste de 2 Barras

Barra	$ V ^{A,B,C}$	$ I_i ^{A,B,C}$
1	1,0000	1,1081
2	0,9024	1,1081
Linha	$r^{A,B,C}$	$b^{A,B,C}$
1 - 2	0,0495	0,0946

Com a intenção de melhor visualizar a aquisição de dados e o sistema de medição para este estudo de caso é oportuno analisar o diagrama apresentado na Figura 3, que contempla os diversos equipamentos envolvidos na obtenção de medidas para o processo de ESEEP.

No primeiro cenário de teste foram simulados sinais (medidas dos sensores) sem presença de ruído algum e considerando EG unicamente no TP da barra 1 fase C. Na Figura 3 esse sensor, com presença de EG, está sinalizado (em realce na cor rosa). Destaca-se que o mesmo é responsável por compor mais de uma medida.

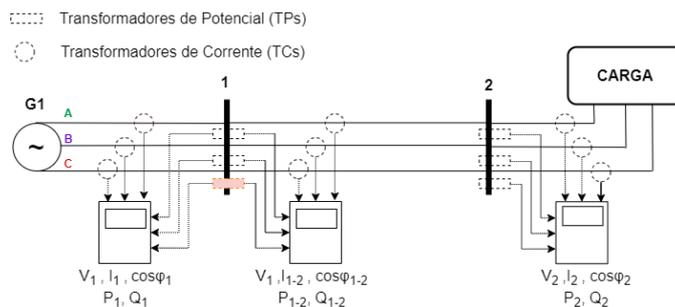


Figura 3. Aquisição de medidas no sistema de teste de 2 barras

A Tabela 2 apresenta os valores de referência das medidas (Z^{ref}), obtidos sem considerar ruído ou EG em sinal de sensor algum, e os valores das medidas que seriam fornecidas ao estimador de estado a partir das grandezas elétricas medidas pelos sensores considerando valores de EGs de 10σ ($Z^{10\sigma}$) e 15σ ($Z^{15\sigma}$) no sinal do sensor unicamente do TP da barra 1 fase C.

Tabela 2. Valores das Medidas - Sistema de teste de 2 barras - Cenário 1

Medida	Z^{Ref}	$Z^{10\sigma}$	$Z^{15\sigma}$
V_1	1,0000	1,011	1,0167
P_1	0,9608	0,9714	0,9768
Q_1	0,5521	0,5581	0,5613
P_{12}	0,9608	0,9714	0,9768
Q_{12}	0,5521	0,5581	0,5613
V_2	0,9024	0,9024	0,9024
P_2	-0,9000	-0,9000	-0,9000
Q_2	-0,4359	-0,4359	-0,4359

Os valores da Tabela 2 evidenciam o surgimento do efeito de espalhamento do EG do sensor responsável pela medição de magnitude de tensão na barra 1, fase C, para todas as medidas cujos valores dependem da informação desse sensor (destacadas na cor vermelha). Comprovando, dessa forma, que os ruídos das medidas não podem ser considerados como variáveis aleatórias independentes.

O segundo cenário considerando o sistema teste de 2 barras corresponde à execução de 100 simulações para o sistema de medição retratado na Figura 3. Entretanto, além de um EG de 15σ no TP da barra 1 fase C, adicionam-se ruídos aleatórios independentes, limitados a $\pm 3\sigma$, em todos os outros sensores, para cada uma das 100 simulações. Sendo assim, emprega-se o processamento de EGs pela técnica do maior resíduo normalizado e as medidas identificadas como portadoras de EGs são computadas e eliminadas. A Tabela 3 apresenta os EGs apontados perante as 100 simulações.

Dada a Tabela 3 verifica-se a falha na identificação das medidas portadoras de EGs. Visto que, em pouco mais da metade das simulações o processamento de EGs ocorreu de forma correta (unicamente em medidas da barras 1). Entretanto, ressalta-se que ele continua a influenciar outras medidas, dependentes e não dependentes do sensor com EG.

Tabela 3. EGs identificados e eliminados para o sistema de teste de 2 barras - Cenário 2

Nº de casos	Tipo de EG identificado
51	Unicamente em medidas da barra 1
30	Medidas da barra 1 e da barra 2
10	Medidas unicamente da barra 2
9	Sem constatação de EG

Além do exposto pela Tabela 3, menciona-se que a deficiência no processamento de EG gera imprecisão nas estimativas de estado, sendo que, para este caso, identifica-se um erro percentual, obtido por (13), de até 15,5% para θ_2 e 6,7% para V_2 .

$$e(\%) = \frac{Valor^{Referência} - Valor^{Estimado}}{Valor^{Referência}} \times 100\% \quad (13)$$

5.2 Sistema de teste do IEEE de 14 Barras

A fim de simular um sistema maior, com alguns laços, considerou-se o sistema de teste do IEEE de 14 barras, fazendo uso de um sistema de medição redundante, conforme representado pelo diagrama unifilar exposto na Figura 4.

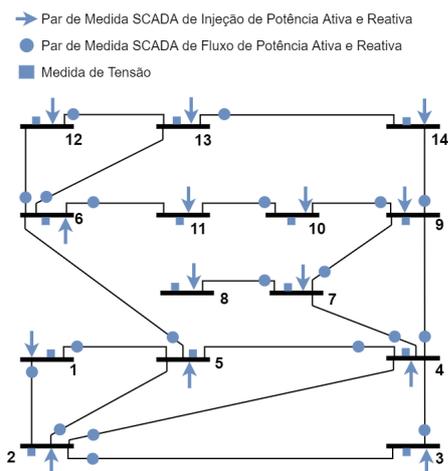


Figura 4. Sistema de medição adotado para simulação no sistema do IEEE de 14 barras

Assim como no estudo de caso anterior, emula-se ruído limitado a $\pm 3\sigma$, com distribuição gaussiana independente para cada sensor, e insere-se um EG no TP da barra 1 fase C. Posto isso, foram considerados 100 eventos a fim de verificar a acurácia do estimador WLS tradicional, fazendo uso do avaliação por erro percentual (13).

Perante ao exposto, a Figura 5 traz o boxplot que reúne o erro percentual das estimativas de estado. À vista disso, o gráfico dado pela Figura 6 apresenta as medidas identificadas como portadoras de EGs para os 100 casos avaliados.

Em observação à Figura 5 nota-se uma dispersão maior nas estimativas das variáveis de estado referentes à componente angular das tensões nas barras, chegando a um erro percentual de até 2,57%. O fato apresentado pode ser explicado, dentre alguns fatores, pela não identificação e

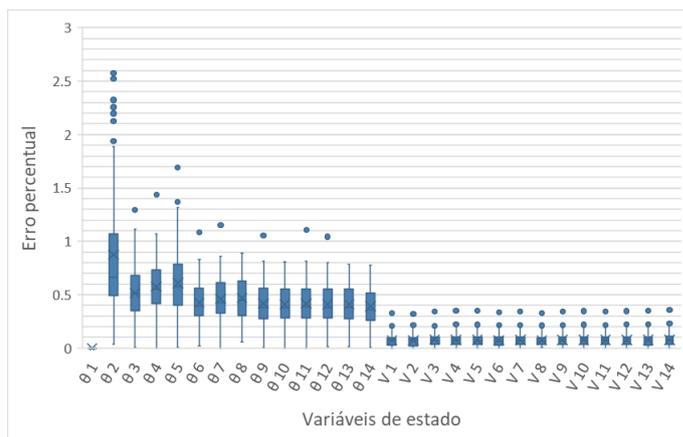


Figura 5. Erro percentual das variáveis de estado referente a 100 simulações

eliminação das medidas portadoras de EG mediante falha de não se considerar a dependência dos erros. Logo, ocorre a eliminação de medidas "sadias", ou seja, de medidas que não sofrem de influência do sinal do sensor com EG.

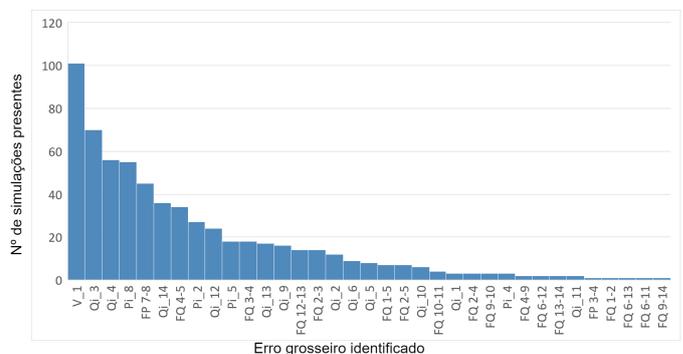


Figura 6. EGs identificados nas simulações

Isso posto, a Figura 6 evidencia, para os mesmos cenários e simulações, que mesmo identificando uma única medida portadora de EG, o EG oriundo de um único sensor se comporta como EGs múltiplos interativos em medidas e, em sua maioria, "mascarados", mediante aos baixos valores dos resíduos normalizados e pela não consideração da dependência entre as medidas.

6. CONCLUSÃO

A partir da proposição de uma nova sistemática de avaliação, que possibilita a inserção de ruídos e EGs em sinais de sensores (medidas obtidas pelos sensores), foi possível avaliar a influência desses ruídos e EGs na acurácia das estimativas obtidas através do estimador de estado WLS associado ao teste do maior resíduo normalizado.

Importa lembrar que usualmente a avaliação da acurácia de estimadores de estado é realizada a partir da inserção de ruídos e EGs diretamente nas medidas que serão consideradas no processo de EESEP. Entretanto, tendo em vista que as medidas compartilham sinais provenientes de sensores, a avaliação da acurácia do processo de EESEP deve ser realizada considerando ruído e EG nos sinais de sensores, obtendo os valores das medidas a partir desses sinais.

Os resultados obtidos e apresentados neste artigo comprovam que EGs em um único sensor prejudica de forma significativa a acurácia das estimativas obtidas pelo estimador WLS tradicional, fazendo com que o EG em um único sensor se comporte como um EG múltiplo interativo e conformativo de medidas.

Face aos resultados apresentados neste artigo comprova-se que a hipótese de os erros das medidas serem considerados como variáveis aleatórias independentes não está correta. Como propostas para trabalhos futuros, a fim de melhorar a estimação e processamento de EGs, sugere-se: (i) considerar a dependência entre medidas processadas, (ii) incluir a modelagem trifásica da rede elétrica, para possibilitar a análise do problema para redes de distribuições que são usualmente assimétricas com cargas desbalanceadas, e (iii) desenvolvimento de um modelo de medição com base diretamente nos sinais fundamentais de corrente e tensão aferidos pelos sensores.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro fornecido pela CNPq (processo nº 314439/2021-8) e à Universidade de São Paulo (USP).

REFERÊNCIAS

- Abur, A. and Exposito, A.G. (2004). *Power system state estimation: theory and implementation*. CRC press.
- Arghira, N., Hossu, D., Fagarasan, I., Iliescu, S.S., and Costianu, D.R. (2011). Modern scada philosophy in power system operation-a survey. *University "Politehnica" of Bucharest Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering*, 73(2), 153–166.
- Balu, N., Bertram, T., Bose, A., Brandwajn, V., Cauley, G., Curtice, D., Fouad, A., Fink, L., Lauby, M.G., Wollenberg, B.F., et al. (1992). On-line power system security analysis. *Proceedings of the IEEE*, 80(2), 262–282.
- Bretas, A., Bretas, N., London Jr, J.B., and Carvalho, B. (2021). *Cyber-Physical Power Systems State Estimation*. Elsevier.
- Caro, E., Conejo, A.J., and Minguez, R. (2009). Power system state estimation considering measurement dependencies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(4), 1875–1885.
- Caro, E., Conejo, A.J., Mínguez, R., Zima, M., and Andersson, G. (2011). Multiple bad data identification considering measurement dependencies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(4), 1953–1961.
- Caro, E., Morales, J.M., Conejo, A.J., and Minguez, R. (2010). Calculation of measurement correlations using point estimate. *IEEE transactions on power delivery*, 25(4), 2095–2103.
- Caro, E. and Valverde, G. (2013). Impact of transformer correlations in state estimation using the unscented transformation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(1), 368–376.
- Choi, D.H. and Xie, L. (2014). Sensitivity analysis of real-time locational marginal price to scada sensor data corruption. *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(3), 1110–1120. doi:10.1109/TPWRS.2013.2293634.
- Dobakhshari, A.S., Abdolmaleki, M., Terzija, V., and Azizi, S. (2021). Robust hybrid linear state estimator utilizing scada and pmu measurements. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(2), 1264–1273.
- Dobakhshari, A.S., Azizi, S., Paolone, M., and Terzija, V. (2019). Ultra fast linear state estimation utilizing scada measurements. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(4), 2622–2631.
- Jovicic, A. and Hug, G. (2020). Linear state estimation and bad data detection for power systems with rtu and pmu measurements. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14(23), 5675–5684.
- Kezunovi, M., Djoki, T., and Kosti, T. (2005). Automated monitoring and control using new data integration paradigm. In *Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 66a–66a. IEEE.
- Massignan, J.A., London, J.B., Bessani, M., Maciel, C.D., Fannucchi, R.Z., and Miranda, V. (2021). Bayesian inference approach for information fusion in distribution system state estimation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 13(1), 526–540.
- Monticelli, A. (2000). Electric power system state estimation. *Proceedings of the IEEE*, 88(2), 262–282.
- Monticelli, A. and Garcia, A. (1983). Reliable bad data processing for real-time state estimation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-102(5), 1126–1139.
- Muscas, C., Pau, M., Pegoraro, P.A., and Sulis, S. (2013). Impact of input data correlation on distribution system state estimation. In *2013 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPs)*, 114–119. IEEE.
- Pau, M., Pegoraro, P.A., and Sulis, S. (2014). Effects of pmu measurements correlation on state estimation results. In *2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, 420–425. IEEE.
- Schweppé, F.C. and Wildes, J. (1970). Power system static-state estimation, part i: Exact model. *IEEE Transactions on Power Apparatus and systems*, (1), 120–125.
- Van Cutsem, T., Ribbens-Pavella, M., and Mili, L. (1984). Hypothesis testing identification: A new method for bad data analysis in power system state estimation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (11), 3239–3252.
- Wu, F.F. (1990). Power system state estimation: a survey. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 12(2), 80–87.
- Wu, F.F., Moslehi, K., and Bose, A. (2005). Power system control centers: Past, present, and future. *Proceedings of the IEEE*, 93(11), 1890–1908.