

Processamento de Erros na Estimação de Estados Desacoplada em Sistemas de Transmissão e Distribuição via Testes Geométricos

Andressa L. Monteiro* Elizete M. Lourenço** Odilon L. Tortelli***

Departamento de Engenharia Elétrica (DELT)
Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Curitiba, Paraná

* e-mail: andressamonteiro@ufpr.br

** e-mail: elizete@eletrica.ufpr.br

*** e-mail: odilon@eletrica.ufpr.br

Abstract: This paper presents a technique for processing simultaneous errors in decoupled generalized state estimation via geometric tests considering both models: bus-branch modeling and substation level modeling. Geometric tests are able to compose sets with suspicious information and identify the source of the error without the need for re-estimation. In addition, the purpose of this work covers the processing of errors in measurements for distribution systems, combining geometric tests with decoupled methods. The performance of the proposed methodology was evaluated through simulations involving the IEEE 30-bus transmission system, modeled at the substation level, and a 141-bus distribution system, represented as a bus-branch network, where various combinations of measurement errors and topology are evaluated.

Resumo: Este trabalho apresenta uma técnica de processamento de erros simultâneos na estimação de estados desacoplada via testes geométricos, considerando ambas as modelagens: modelagem barra-ramo e modelagem no nível de subestação. Os testes geométricos são capazes de formar conjuntos com as informações suspeitas e identificar a origem do erro sem a necessidade de sucessivas reestimações de estado. Além disso, a proposta deste trabalho abrange o processamento de erros em medidas para sistemas de distribuição, aliando os testes geométricos aos métodos desacoplados. O desempenho da metodologia proposta foi avaliado através de simulações envolvendo o sistema de transmissão IEEE 30 barras, modelado no nível de subestação, e um sistema de distribuição de 141 barras, como modelagem barra-ramo, onde diversas combinações de erros em medidas e erros de topologia são avaliados.

Keywords: bad data processing; geometric tests, state estimation, decoupled methods.

Palavras-chaves: processamento de erros; testes geométricos, estimação de estados, métodos desacoplados.

1. INTRODUÇÃO

Visando manter as condições de operação normais e seguras do sistema elétrico de potência, o estimador de estados processa dados redundantes de medidas em tempo real através de processos estatísticos e fornece o estado de operação atual da rede (Schweppe and Wildes, 1970; Monticelli, 1999; Abur and Exposito, 2004). Para garantir a acurácia da estimação de estados (EE), uma etapa fundamental é o processamento de erros. Desde o conjunto de publicações em Schweppe and Wildes (1970), as formulações consolidadas seguiram-se majoritariamente voltadas para os sistemas de transmissão na modelagem barra-ramo da rede, a qual, em geral, assume que a topologia está correta, focando o processamento de erros em medidas analógicas (Monticelli, 1999). Na década de 90, a pro-

posta de representação explícita dos disjuntores permitiu a modelagem da rede no nível de subestação (ou seção de barras). Baseados na inclusão dos fluxos de potência através de ramos chaveáveis como novas variáveis de estado do problema de EE e da inclusão das informações sobre os status de chaves e disjuntores como pseudomedidas, a nova abordagem deu origem à Estimação de Estados Generalizada (EEG) (Alsac et al., 1998).

A partir da representação detalhada das subestações, avanços significativos foram obtidos nas pesquisas e algoritmos para processamento de erros de topologia. Clements and Davis (1988) e Wu and Liu (1989), por exemplo, utilizaram o teste do Máximo Resíduo Normalizado (MRN), amplamente empregado no processamento de erros grosseiros em medidas (Abur and Exposito, 2004), para a detecção e identificação de erros de topologia. Nesse teste, analisa-se os resíduos associados às medidas e às pseudomedidas operacionais, as quais estão relacionadas com os status dos disjuntores na formulação via Método dos Mínimos Qua-

* O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

drados Ponderados (MMQP). Numa outra abordagem, os status dos disjuntores são representados como restrições de igualdade (restrições operacionais) na formulação do problema de EE, sendo este resolvido pelo Método do Tableau. Nesse caso, os multiplicadores de Lagrange associados às restrições operacionais são normalizados e utilizados para processamento de erros de topologia (Clements and Costa, 1998). Assim como no teste do MRN, o status associado ao maior multiplicador de Lagrange normalizado (MMLN) é identificado como estando erroneamente modelado. Ambos os testes, MRN e MMLN, são métodos enumerativos, que necessitam de sucessivas reestimações para a identificação de erros.

Na literatura são apresentados métodos não-enumerativos para o processamento de erros grosseiros em medidas e de erros de topologia, os quais evitam a necessidade de reestimações durante a identificação da origem do erro. Testes de Hipóteses baseado no teorema de Bayes são propostos em Lourenço et al. (2002) e Lourenço et al. (2004) para o processamento de erros de topologia. Nessa abordagem, uma interpretação geométrica dos multiplicadores de Lagrange é associada aos Testes de Hipóteses para o processamento de identificação de erros de topologia na EEG. Em Lourenço et al. (2006), uma nova abordagem é apresentada em que todo o processo de identificação dos erros de topologia, desde a pertinência das informações no conjunto suspeito até a identificação dos disjuntores errôneos, é baseado nos testes geométricos originados em Lourenço et al. (2002). Em Coelho et al. (2012) o processamento de erros simultâneos de erros grosseiros em medidas analógicas e de erros de topologia na EEG é abordado. O método proposto baseia-se na solução da EEG pelo Método do Tableau Esparsa, no uso dos mutiplicadores de Lagrange normalizados e nos testes geométricos.

Apesar da EEG propiciar um processamento bem mais efetivo de erros de topologia, sua adoção implica em um aumento na dimensão do problema de EE. Para mitigar esse problema, em Nogueira et al. (2018), aplicações das técnicas de desacoplamento, inicialmente apresentadas considerando a modelagem barra-ramo da rede (Horisberger et al., 1976; Garcia et al., 1979), são consideradas na EEG. Ambos os métodos desacoplados, versões no algoritmo e no modelo, são apresentados para a EEG, dando origem à Estimação de Estados Generalizada Desacoplada Rápida (EEG-DR) para sistemas de transmissão (Nogueira et al., 2018).

Com o aumento da geração distribuída e crescente inserção de fontes renováveis no sistema elétrico, a estimação de estados nos sistemas de distribuição (EESD) tem sido foco de muitos estudos (Primadianto and Lu, 2016; Dehghanpour et al., 2018). Em Nogueira et al. (2019) é apresentado um algoritmo de processamento de erros em medidas para EESD. O método utiliza o teste do Qui-Quadrado na etapa de detecção, enquanto que o processo de identificação baseia-se no Teste do MRN. Na EESD aplicou-se também o desacoplamento das medidas, viabilizado pela aplicação da normalização complexa por unidade (*cpu*) apresentada em Tortelli et al. (2015), a qual contorna os problemas da baixa relação da razão da reatância pela resistência (X/R) típica de redes de distribuição.

Baseado nos avanços do uso dos métodos desacoplados para a EEG, no desempenho do uso dos testes geométricos para processamento de erros e na viabilização do uso da EEDR para sistemas de distribuição via normalização complexa, este trabalho propõe um algoritmo de processamento de erros na EE desacoplada no modelo para sistemas de transmissão e distribuição exclusivamente baseado na aplicação de testes geométricos. A avaliação da manutenção da efetividade dos testes geométricos na abordagem desacoplada quando aplicada para sistemas de transmissão, bem como quando aplicada para sistemas de distribuição (nesse caso combinada com a técnica *cpu*), foi realizada a partir de diversas simulações e testes. O sistema de transmissão IEEE 30 barras com modelagem no nível de subestação foi usado para a avaliação do processamento simultâneo de erros em medidas e topologia na EEG-DR. Um sistema de distribuição contemplando 141 barras e considerando a modelagem barra-ramo viabilizou testes de processamento de erros grosseiros em medidas na EESD desacoplada via testes geométricos.

2. ESTIMAÇÃO DE ESTADOS DESACOPLADA RÁPIDA (EEDR) PARA SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO

Em busca de melhorias no condicionamento numérico e tempo computacional, buscou-se alternativas para a solução do problema de EE. Devido às alterações não significativas na matriz ganho durante as iterações, em relação aos valores obtidos na convergência do problema (Abur and Exposito, 2004), e também pela alta relação X/R observada em sistemas de transmissão, constatou-se a possibilidade de implementar os métodos desacoplados no problema de EE (Garcia et al., 1979). Considerando a formulação clássica da EE pelo MMQP no modelo barra-ramo da rede (Monticelli, 1999; Abur and Exposito, 2004), o problema de estimação é resolvido através da minimização da seguinte função objetivo (Abur and Exposito, 2004):

$$J(\hat{x}) = [z_m - h_m(\hat{x})]^T R_m^{-1} [z_m - h_m(\hat{x})] \quad (1)$$

onde: z_m é o vetor das quantidades medidas, $h_m(\cdot)$ é o vetor de funções não lineares que relaciona as quantidades medidas às variáveis de estado x , \hat{x} é o vetor de estados estimados e R_m é a matriz de covariância das medidas.

A Equação (1) pode ser resolvida através da solução iterativa do sistema linear a seguir (Abur and Exposito, 2004):

$$G(\hat{x}^k) \Delta x^{k+1} = T \quad (2)$$

onde $G(\hat{x})$ é a matriz ganho e T o vetor do lado direito do processo de EE dados por:

$$G(x) = [H^T(\hat{x}^k) R_m^{-1} H(\hat{x}^k)] \quad (3)$$

$$T = [H^T(\hat{x}^k) R_m^{-1} (z_m - h(\hat{x}^k))] \quad (4)$$

sendo $H(\hat{x})$ a matriz Jacobiana definida por:

$$H(\hat{x}) = \frac{\partial h(\hat{x})}{\partial \hat{x}} \quad (5)$$

Na formulação desacoplada as equações de EE são particionadas conforme a natureza ativa (sobrescrito A) e reativa (sobrescrito R) (Garcia et al., 1979):

$$x^A = [\theta]; x^R = [V] \quad (6)$$

$$z_m^A = \begin{bmatrix} z_{fluxo}^A \\ z_{inj}^A \end{bmatrix}; z_m^R = \begin{bmatrix} z_{fluxo}^R \\ z_{inj}^R \\ z_{Vmag}^R \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$h_m^A(\hat{x}^k) = \begin{bmatrix} P_{fluxo} \\ P_{inj} \end{bmatrix}; h_m^R(\hat{x}^k) = \begin{bmatrix} Q_{fluxo} \\ Q_{inj} \\ V_{mag} \end{bmatrix} \quad (8)$$

A matriz de covariância na EEDR é dada por:

$$R_m = \begin{bmatrix} R_m^A & 0 \\ 0 & R_m^R \end{bmatrix} \quad (9)$$

Neste trabalho utilizou-se o método desacoplado no modelo, ao qual são realizadas simplificações somente na matriz Jacobiana durante o processo iterativo, onde as submatrizes fora da diagonal principal (H_{PV} e $H_{Q\theta}$) são desprezadas, bem como as resistências das linhas de transmissão na matriz $H_{P\theta}$ (Garcia et al., 1979):

$$H = \begin{bmatrix} H_{P\theta} & 0 \\ 0 & H_{QV} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Assim, a solução da EE via método desacoplado no modelo compreende a solução iterativa de dois sistemas lineares idênticos aos apresentados em (3) e (4), porém divididos (desacoplados) em dois subproblemas: ativo e reativo. O processo iterativo é concluído quando os dois subproblemas atendem o critério de convergência.

2.1 Formulação da EEG-DR para ST

A fim de representar o sistema elétrico de potência com mais fidelidade, a configuração das subestações podem ser consideradas explicitamente na formulação do problema de EE, conforme demonstrado em Alsac et al. (1998), via EEG. O impacto do aumento inevitável da dimensão do problema na EEG, ocasionado pelo acréscimo de variáveis de estado (fluxos de potência ativa e reativa através dos ramos chaveáveis) e das novas informações oriundas da modelagem detalhada das subestações pode ser significativamente aliviado pela implementação dos métodos desacoplados, conforme proposto em Nogueira et al. (2018), dando origem à EEG-DR.

Nessa formulação, as informações referentes ao status dos disjuntores (aberto ou fechado) são adicionadas como pseudomedidas operacionais no problema de EE e o vetor estendido da EEG clássica é particionado conforme a natureza ativa e reativa (Nogueira et al., 2018). O vetor de estados passa a ser dado por:

$$x^A = \begin{bmatrix} \theta \\ t \end{bmatrix}; x^R = \begin{bmatrix} V \\ u \end{bmatrix} \quad (11)$$

onde t é o vetor de fluxo de potência ativa através dos ramos chaveáveis e u é o vetor de fluxo de potência reativa através dos ramos chaveáveis.

Os status dos dispositivos são representados como aberto através da pseudomedida de fluxo de potência ativo e reativo nulos para o referido dispositivo, e como fechado através da pseudomedida de diferença angular e queda de tensão nulas nos terminais do ramo chaveável. Cabe ressaltar que na EEG-DR todos os vetores estendidos provenientes da EEG são desacoplados conforme a natureza, bem como a matriz Jacobiana e matriz ganho que são aumentadas em decorrência da representação dos ramos chaveáveis.

Neste trabalho empregou-se a formulação da EEG-DR no modelo. Assim como a EEDR no modelo clássica, na EEG-DR no modelo, as submatrizes fora da diagonal principal da matriz Jacobiana, dada em (10), são desprezadas. A matriz Jacobiana estendida correspondente é dada por (Nogueira et al., 2018):

$$\bar{H}_{P\theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{fluxo}}{\partial \theta} & 0 \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial \theta} & 0; \pm 1 \\ 0; \pm 1 & 0 \\ 0; \pm 1 & 0; \pm 1 \end{bmatrix}, \bar{H}_{PV} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{fluxo}}{\partial V} & 0 \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial V} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\bar{H}_{Q\theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{fluxo}}{\partial \theta} & 0 \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial \theta} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \bar{H}_{QV} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{fluxo}}{\partial V} & 0 \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial V} & 0; \pm 1 \\ \frac{\partial V_{mag}}{\partial V} & 0 \\ 0; \pm 1 & 0 \\ 0 & 0; \pm 1 \end{bmatrix}$$

2.2 Métodos Desacoplados na EESD

Um dos obstáculos da implementação dos métodos desacoplados na EESD é a baixa relação da razão X/R tipicamente observados em redes de distribuição. Tortelli et al. (2015) demonstram que os efeitos da baixa relação X/R em degradar o desempenho dos métodos desacoplados podem ser evitados através da aplicação de uma extensão do conceito de normalização por unidade (pu), denominada normalização complexa por unidade (cpu). A cpu pressupõe a adoção de uma potência de base complexa, cujo ângulo permite um ajuste artificial da relação X/R , conforme demonstrado em Tortelli et al. (2015):

$$\frac{X_{cpu}}{R_{cpu}} = \tan(\theta + \phi_{base}) \quad (13)$$

sendo ϕ_{base} o ângulo de base, determinado por:

$$\phi_{base} = \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha_{avg} + \gamma_{avg}}{2}\right)(1 + \epsilon) \quad (14)$$

onde: α_{avg} e γ_{avg} é a relação média X/R (em radianos) e a média entre a relação X/R máxima e mínima (em radianos), respectivamente. Esses valores são calculados da seguinte maneira:

$$\alpha_{avg} = \sum_{i=1}^{n_l} \frac{\tan^{-1} \frac{X_i}{R_i}}{N_l} \quad (15)$$

$$\gamma_{avg} = \frac{\tan^{-1} \left(\frac{X_i}{R_i}\right)_{max} + \tan^{-1} \left(\frac{X_i}{R_i}\right)_{min}}{2} \quad (16)$$

onde ϵ é o índice de fator de carregamento, calculado por:

$$\epsilon = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_b} \cos(\tan^{-1} \frac{Q_i}{P_i})}{N_b} \quad (17)$$

n_b é o número de barras do sistema; n_l é o número de linhas do sistema; X_i é a reatância da linha i ; R_i é a resistência da linha i ; P_i é a injeção de potência ativa na barra i ; e Q_i é a injeção de potência reativa na barra i .

A partir da normalização dos parâmetros de entrada do sistema e normalização das medidas do estimador, os métodos desacoplados podem ser eficientemente aplicados para sistemas de distribuição.

3. PROCESSAMENTO DE ERROS NA EEDR

O processamento de erros é composto por duas etapas: a detecção, onde verifica-se a presença (ou não) de alguma anomalia na rede, e a identificação, onde é identificada a origem exata da anomalia. Neste trabalho implementou-se o teste do MRN para a detecção e os testes geométricos para o processo de identificação. O processo de identificação é composto por duas etapas: a formação de um conjunto suspeito e a identificação de quais informações suspeitas são de fato portadoras de erros. Nesse trabalho, os resíduos normalizados bem como os conjuntos suspeitos seguem o processo de desacoplamento, ou seja, partição ativa e partição reativa. No processamento de erros da EEG-DR, além das medidas, a topologia da rede também é investigada através das pseudomedidas operacionais relativas aos ramos chaveáveis. Já para o processamento de erros na EESD desacoplada, a abordagem barra-ramo é adotada e apenas erros grosseiros em medidas são analisados.

3.1 Detecção de erros via teste do MRN

O teste do MRN é bem consolidado para o processamento de erros grosseiros. Nesse caso os resíduos são normalizados e comparados a um limiar pré-estabelecido obtida pela distribuição normal (Garcia et al., 1979; Abur and Exposito, 2004):

$$r_i^N = \frac{|r_i|}{\sqrt{\Omega_{ii}}} \quad (18)$$

onde r_i é o resíduo da i -ésima medida; Ω_{ii} é i -ésimo elemento da diagonal da matriz de covariância dos resíduos (Ω), a qual é obtida por (Abur and Exposito, 2004):

$$\Omega = SR \quad (19)$$

sendo S a matriz de Sensibilidade definida por:

$$S = 1 - HG^{-1}H^T R^{-1} \quad (20)$$

Se o máximo r^N é maior que o limiar pré-estabelecido: *Erro detectado*, deve-se prosseguir para a etapa de identificação do erro. A criticidade das medidas e pseudomedidas deve ser levada em consideração, lembrando que essas podem ser analisadas a partir de métodos numéricos ou topológicos (Abur and Exposito, 2004).

A formação do conjunto de medidas/pseudomedidas suspeitas segue o processo de detecção e é feita a partir da avaliação dos valores dos r^N . As duas etapas podem ser descritas pela seguinte sequência:

- (1) Resolver o problema de EE via MMQP e obter o vetor dos resíduos das medidas/pseudomedidas;
- (2) Calcular os resíduos normalizados;
- (3) Se o maior valor dentro do conjunto dos resíduos normalizados obtidos na etapa anterior for superior ao limiar pré-estabelecido: Erro detectado, seguir para a próxima etapa; Caso contrário, erro não detectado.
- (4) Identificar todos os resíduos normalizados maiores que o limiar pré-estabelecido e selecionar a medida/pseudomedida correspondente a esses resíduos como suspeita.

Esse procedimento é adotado para ambos os subproblemas ativo e reativo. Assim, forma-se um conjunto suspeito ativo e um conjunto suspeito reativo, composto pelas medidas/pseudomedidas com valores dos resíduos maiores que o limiar.

3.2 Identificação de erros via Testes Geométricos

Para garantir que todas as informações errôneas estão dentro dos seus respectivos conjuntos suspeitos, utiliza-se os testes geométricos. As informações contidas no conjunto suspeito são analisadas através do cosseno do ângulo (θ) entre o vetor dos resíduos normalizados e a projeção no espaço gerado pelas colunas da matriz de covariância dos resíduos correspondentes ao conjunto suspeito. Analogamente à relação entre o multiplicador de Lagrange e a matriz de covariância dos multiplicadores (Lourenço et al., 2002), o resíduo está diretamente relacionado com a matriz de covariância e com os erros:

$$r = \Omega \epsilon \quad (21)$$

onde r é o vetor dos resíduos; Ω é a matriz de covariância dos resíduos e ϵ é o vetor contendo os erros (de medidas e pseudomedidas).

A matriz de covariância Ω é particionada conforme as colunas linearmente independentes de Ω em relação as informações suspeitas (Ω_s), outra parte correspondente a informação sem erro e as colunas correspondentes às

informações críticas. A partição de interesse é a Ω_s , sendo que se todas as informações errôneas estiverem dentro do conjunto suspeito, o vetor de resíduos estará no mesmo espaço de Ω_s e o valor de cosseno de θ pode ser obtido por (Lourenço et al., 2015):

$$\cos\theta = \sqrt{\frac{r_S^T (\Omega_S^T R \Omega_S)^{-1} r_S}{r^T R^{-1} r}} \quad (22)$$

Caso o valor do cosseno de θ seja muito próximo de 1,0, isso indica que todas as informações errôneas estão dentro do conjunto suspeito. Caso contrário, tal valor será notadamente inferior à 1,0. A partir da confirmação da presença de todas as informações errôneas dentro do conjunto suspeito em análise, parte-se para a identificação da anomalia, também realizada via testes geométricos. Cada informação é retirada temporariamente do conjunto suspeito e o cosseno é recalculado.

O procedimento do teste geométrico e triagem das informações do conjunto suspeito pode ser descrito da seguinte maneira:

- (1) Formação dos conjuntos suspeitos com as pseudomedidas dos status dos disjuntores (ativas e reativas) e medidas convencionais (ativas e reativas) associadas aos resíduos normalizados maiores que o limiar determinado;
- (2) Cálculo do cosseno de θ dos conjuntos suspeitos das pseudomedidas dos status dos disjuntores (ativas e reativas) e medidas convencionais (ativas e reativas);
- (3) Cosseno com valor próximo de 1,0: todas as informações errôneas estão dentro do seu respectivo conjunto suspeito;
- (4) Retira-se uma informação e recalcula-se o cosseno;
 - 4.1 Caso o valor do cosseno continue próximo de 1,0, conclui-se que o conjunto suspeito ainda contém todas as informações errôneas, ou seja, a informação retirada não é errônea. Retira-se definitivamente essa informação do conjunto.
 - 4.2 Caso contrário, se o valor do cosseno se afastar significativamente de 1,0: significa que nem todas as informações errôneas estão dentro do conjunto suspeito, ou seja, a informação retirada é uma das errôneas. Coloca-se novamente essa informação no conjunto. Repete-se o passo (4) até que todas as medidas de cada conjunto suspeito sejam avaliadas. Ao final do processo, somente as medidas/pseudomedidas errôneas estarão contidas no conjunto suspeito avaliado.

No processamento de erros na EEG-DR, o algoritmo primeiro verifica a presença de erros na topologia, através dos resíduos das pseudomedidas dos status dos disjuntores ativas e reativas. Se os resíduos normalizados associados às pseudomedidas forem maiores que o limiar, forma-se o conjunto suspeito e parte-se para o processo de identificação via testes geométricos descrito acima. O erro de topologia é corrigido, os estados são reestimados e dá-se início ao processamento de erros nas medidas convencionais. O processamento de erros em medidas segue as mesmas etapas de detecção e identificação do processamento de erros de topologia, descritas anteriormente.

No processamento de erros para a modelagem barra-ramo, adotada para a EESD desacoplada proposta, a topologia

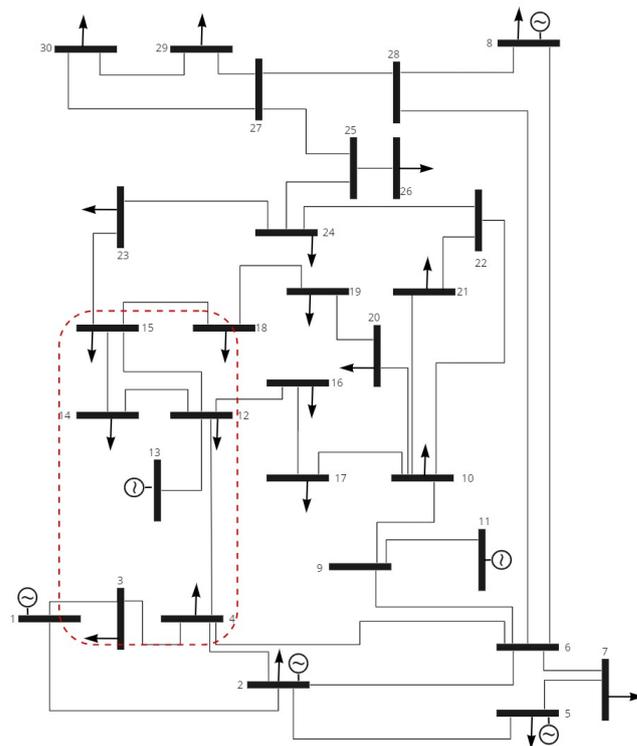


Figura 1. Sistema IEEE 30 barras

da rede é assumida correta. Assim, após a normalização das medidas, os resíduos normalizados das medidas são calculados. Uma vez detectada a presença de erro grosseiro (maior resíduo normalizado superior ao limiar), o conjunto suspeito é formado com todas as medidas (ativas e reativas) com resíduos normalizados maiores que o limiar e os conjuntos suspeitos são investigados via testes geométricos, conforme descrito anteriormente.

4. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Para o processamento de erros simultâneos na EEG-DR em ST utilizou-se um sistema-teste IEEE 30 barras modelado no nível de subestação. Para o processamento de erros grosseiros em medidas na EESD desacoplada foram realizadas simulações em um sistema de distribuição de 141 barras.

4.1 Processamento de erros simultâneos na EEG-DR em ST

O sistema IEEE 30 barras, apresentado na Figura 1, teve a subestação em destaque representada no nível de subestação, apresentada em detalhes na Figura 2.

Três casos foram simulados para esse sistema, considerando que plano de medição contém o fluxo de potência ativa e reativa nos dois extremos, injeção de potência ativa e reativa em todas as barras assim como a magnitude de tensão.

- Caso A1 - Erro múltiplo em medida: fluxo de potência ativa (z_{1-2}^A) e de potência reativa (z_{2-5}^R);
- Caso A2 - Erro de topologia: erro de exclusão (D_9);
- Caso A3 - Erros simultâneos: medida (potência reativa (z_{2-5}^R) e topologia (exclusão no D_9).

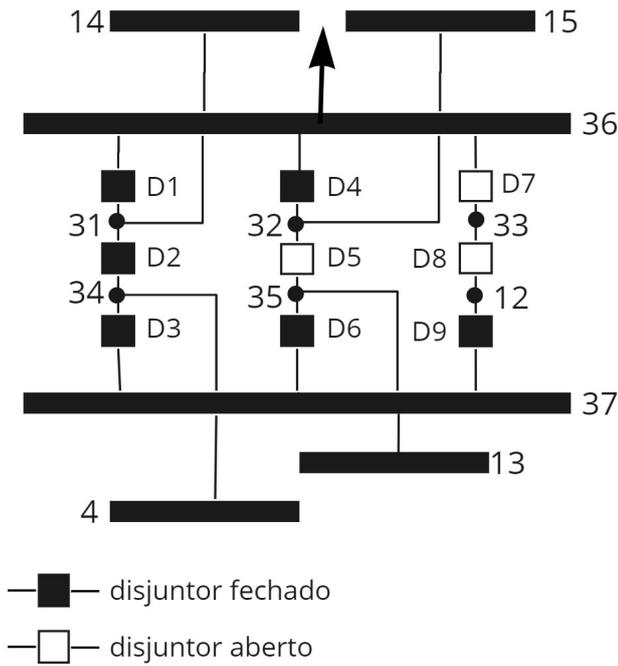


Figura 2. Subestação representada no nível de subestação do Sistema IEEE 30 barras

No caso A1 os erros em medidas convencionais foram simulados pressupondo que a topologia da rede está correta. Na etapa de detecção de erros, os resultados do teste do MRN para este caso são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Detecção de Erros Múltiplos em Medidas via MRN: Caso A1

Medidas Ativas		Medidas Reativas	
Medida Suspeita	Resíduo	Medida Suspeita	Resíduo
z_{1-2}^A	162,9880	z_{2-5}^R	32,9557
z_{1-2}^{Ireal}	7,8767	z_5^{Vmag}	11,4492

O conjunto suspeito, ativo e reativo, é composto pelas medidas ativas e reativas que apresentaram resíduos maiores que o limiar 3,0, conforme apresentado na Tabela 1. Sobre esses conjuntos é aplicado o teste geométrico, tendo como resultados os valores dados na Tabela 2.

Tabela 2. Identificação de Erros Múltiplos em Medidas via Testes Geométricos: Caso A1

Medidas Ativas		Medidas Reativas	
Conjunto Suspeito	$\cos \theta$	Conjunto Suspeito	$\cos \theta$
$z_{1-2}^A, z_{1-2}^{Imag}$	1,0000	z_{2-5}^R, z_5^{Vmag}	1,0000
z_{1-2}^{Imag}	0,3298	z_5^{Vmag}	0,2502

No Caso A1, nota-se que quando todas as medidas convencionais com os resíduos normalizados superiores ao limiar 3,0 estão dentro do conjunto suspeito, o valor do cosseno é 1,0. Isso indica que todas as medidas errôneas estão dentro dos seus respectivos conjuntos suspeitos. A partir disso, retira-se, primeiramente do conjunto suspeito ativo, uma medida por vez para recalcular o cosseno. Quando a medida de fluxo de potência ativa (z_{1-2}^A) é retirada deste conjunto, o valor do cosseno atinge 0,3298. Este valor aponta, então, que nem todas as medidas errôneas estão

mais dentro deste conjunto. Neste caso, conclui-se que a medida ativa com erro foi identificada e parte-se para a análise do conjunto suspeito reativo. Ao retirar a medida de fluxo de potência reativa z_{2-5}^R do conjunto, o cosseno é 0,2502, ou seja, a medida z_{2-5}^R foi identificada como errada.

Para o caso A2 considera-se que as medidas convencionais estão corretas e simula-se somente erro de topologia do tipo exclusão, no qual uma linha que está originalmente em operação é reportada como fora do sistema. O disjuntor D_9 representado na Figura 2 é simulado como aberto. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Detecção de Erro de Topologia via MRN: Caso A2

Pseudomedidas Ativas		Pseudomedidas Reativas	
Pseudomedida Suspeita	Resíduo	Pseudomedida Suspeita	Resíduo
t_{33-12}	102,7824	u_{33-12}	24,7453
t_{12-37}	10,4299	u_{12-37}	5,3920

O algoritmo de processamento de erros proposto primeiro analisa a topologia do sistema. No caso A2, os fluxos de potência ativa (t) e reativa (u) nulas são detectados como errados, indicando a presença de disjuntores abertos, no caso D_8 (entre os nós 12-33) e D_9 (entre 12-37). O conjunto suspeito é formado contendo essas pseudomedidas para aplicação do teste geométrico. Ao retirar a pseudomedida ativa t_{12-37} (D_9), o cosseno atingiu 0,6068. No conjunto suspeito das pseudomedidas reativas, ao retirar u_{12-37} (D_9) o cosseno é de 0,3426. Esses resultados indicam que, de fato, o disjuntor D_9 estava com o status errôneo, isso porque as pseudomedidas relativas aos fluxos de potência ativa e reativa nulos através do disjuntor foram detectadas e identificadas como erradas. Após a identificação e correção do status do disjuntor D_9 , os estados são reestimados. Nenhum erro de topologia é detectado, bem como nenhum erro nas medidas convencionais.

Por fim, no caso A3 as simulações realizadas contemplam erros simultâneos de topologia (D_9) e em medidas convencionais, no fluxo de potência reativa (z_{2-5}^R). A topologia da rede é analisada e ao rodar o algoritmo de processamento de erros, detectam-se pseudomedidas ativas e reativas com resíduos normalizados maiores que o limiar 3,0, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Detecção de Erro de Topologia via MRN: Caso A3

Pseudomedidas Ativas		Pseudomedidas Reativas	
Pseudomedida Suspeita	Resíduo	Pseudomedida Suspeita	Resíduo
t_{33-12}	102,7962	u_{33-12}	24,8200
t_{12-37}	10,4325	u_{12-37}	5,4059

Em seguida, o conjunto suspeito das pseudomedidas ativas e reativas é formado. Verifica-se se todas errôneas estão dentro do conjunto via testes geométricos, visto que o cosseno está próximo de 1,0, e aplica-se novamente o teste para a identificação da anomalia, conforme apresentado na Tabela 5.

No conjunto de pseudomedidas ativas, o fluxo de potência ativa através do disjuntor D_9 é identificado como errado, pois quando retira-se esse disjuntor o valor do cosseno

Tabela 5. Identificação de Erro de Topologia via Testes Geométricos: Caso A3

Pseudomedidas Ativas		Pseudomedidas Reativas	
Conjunto Suspeito	Cosseno	Conjunto Suspeito	Cosseno
t_{33-12}, t_{12-37}	0,9999	u_{33-12}, u_{12-37}	0,9999
t_{33-12}	0,2256	u_{33-12}	0,8539

decrece para 0,2256. Assim como no conjunto de pseudo-medidas reativas, o fluxo de potência reativa através de D_9 é a origem da anomalia, indicando que de fato o disjuntor estava com o status errôneo. O disjuntor errôneo é identificado, seu status é corrigido, os estados são reestimados e nenhum erro de topologia é detectado. Parte-se para a análise das medidas convencionais ativas e reativas e os resultados obtidos estão na Tabela 6.

Tabela 6. Detecção de Erro em Medidas via MRN: Caso A3

Medidas Ativas		Medidas Reativas	
Medida Suspeita	Resíduo	Medida Suspeita	Resíduo
-	-	z_{2-5}^R	32,9549
-	-	z_{5}^{Vmag}	11,4492

No conjunto das medidas ativas, nenhum resíduo apresentou valor maior que o limiar 3,0. Detectou-se resíduos maiores que o limiar nas medidas convencionais reativas. O cosseno do conjunto suspeito reativo foi igual a 1,0, sinalizando que todas as medidas errôneas estão dentro deste conjunto suspeito, conforme demonstrado na Tabela 7.

Tabela 7. Identificação de Erro em Medidas via Testes Geométricos: Caso A3

Medidas Ativas		Medidas Reativas	
Conjunto Suspeito	Cosseno	Conjunto Suspeito	Cosseno
Vazio	-	z_{2-5}^R, z_{5}^{Vmag}	1,0000
		z_{5}^{Vmag}	0,2502

Ao retirar a medida de fluxo de potência reativa z_{2-5}^R , o cosseno do conjunto suspeito atinge 0,2502, indicando que nem todas as medidas errôneas estão presentes nesse conjunto. Como se está lidando com erro simples em medida, conclui-se que a medida retirada é a errônea.

4.2 Processamento de erros em medidas na EESD

Conforme descrito nas seções anteriores, antes do desacoplamento das medidas na EESD no sistema IEEE 141 barras, estas são normalizadas (via *cpu*), realiza-se a EEDR no modelo e enfim os erros são processados. O plano de medição para este sistema contém o fluxo de potência ativa e reativa nos dois extremos, injeção de potência ativa e reativa em todas as barras, assim como as tensões. O ajuste da relação da reatância pela resistência, através da *cpu* é feito através do cálculo do ângulo de base dado em (14). Para este sistema, o ângulo de base adequado foi de $47,26^\circ$ e, como é um SD grande, estipulou-se inicialmente um limiar de 10,0 para os resíduos normalizados com o objetivo de diminuir a quantidade de medidas no conjunto suspeito. Todos os resíduos normalizados com valores superiores à este limiar irão compor o conjunto de medidas consideradas suspeitas. Após a triagem e eliminação das

medidas errôneas uma reestimação de estados é executada e o limiar para detecção e formação de conjuntos suspeitos é reduzido para 3,0. O sistema de distribuição utilizado na simulação é apresentado na Figura 3. São simulados dois casos:

- Caso B1 - Erro simples em medida: fluxo de potência ativa (z_{4-5}^A)
- Caso B2 - Erro múltiplo em medida: fluxo de potência ativa (z_{4-5}^A) e reativa (z_{6-7}^R)

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos para o caso B1.

Tabela 8. Detecção e Identificação de Erros Simples em Medidas na EESD: Caso B1

Detecção do erro		Identificação do erro	
Medidas Suspeitas	Resíduo	Conjunto Suspeito	$\cos\theta$
z_{4-5}^A	21,5751	$z_{4-5}^A, z_{5-4}^A, z_4^A, z_5^A$	1,0000
z_{5-4}^A	19,5248	z_{5-4}^A, z_4^A, z_5^A	0,9368
z_4^A	14,9551	-	-
z_5^A	11,2906	-	-

A presença de medida errônea dentro do conjunto suspeito é confirmada visto que o valor do cosseno é igual à 1,0. Retirou-se a medida z_{4-5}^A , referente ao fluxo de potência ativa na linha subscrita indicada, e o valor do cosseno atingiu o valor de 0,9368, ou seja, nem todas as medidas errôneas estão presentes no conjunto. O processo se repete com a retirada de uma medida por vez, até a identificação de que a origem do erro é, de fato, z_{4-5}^A .

Posteriormente, simulou-se erros grosseiros múltiplos em medidas (caso B2). Os resultados obtidos foram separados conforme o processamento do algoritmo: medidas ativas, na Tabela 9, e medidas reativas na Tabela 10.

Tabela 9. Erros Grosseiros Múltiplos em Medidas Ativas na EESD: Caso B2

Detecção do erro		Identificação do erro	
Medidas Suspeitas	Resíduo	Conjunto Suspeito	$\cos\theta$
z_{4-5}^A	21,5751	$z_{4-5}^A, z_{5-4}^A, z_4^A, z_5^A$	1,0000
z_{5-4}^A	19,5229	z_{5-4}^A, z_4^A, z_5^A	0,9365
z_4^A	14,9523	-	-
z_5^A	11,2959	-	-

O conjunto suspeito ativo é formado por todas as medidas ativas que possuem resíduo normalizado maior que o limiar 10,0. Em seguida, com o uso dos testes geométricos, calcula-se o cosseno e observa-se o valor 1,0, indicando que todas as medidas ativas errôneas estão dentro do conjunto suspeito ativo. Ao retirar a medida de fluxo de potência ativa z_{4-5}^A o valor do cosseno atinge 0,9365, identificando, portanto, que a medida ativa errada é de fato a z_{4-5}^A . É possível afirmar isso pois dentro deste conjunto só há uma medida ativa errônea. Em seguida o conjunto das medidas reativas foi analisado. Quando todas as medidas reativas estão dentro do conjunto suspeito, o cosseno é 0,9785, indicando que todas as medidas errôneas estão dentro deste. Cabe ressaltar a faixa de tolerância do cosseno, onde caso ele seja maior que $\cos\theta - 0,05$, significa presença de erro. Quando retira-se do conjunto suspeito reativo a medida de fluxo de potência reativa z_{6-7}^R , o valor do cosseno atinge 0,8527, apontando, então, a medida retirada como a errada. Nos SDs notou-se que

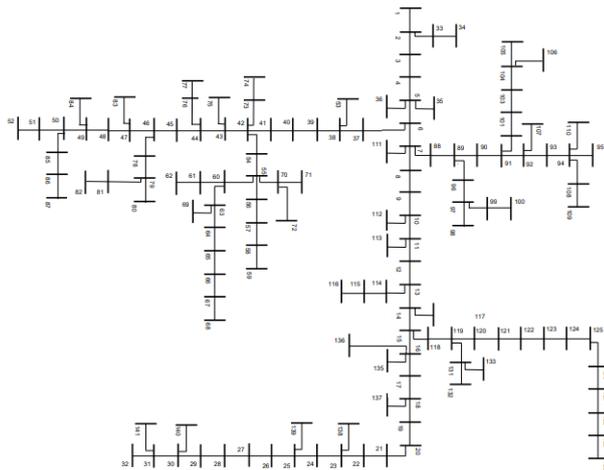


Figura 3. Sistema de Distribuição IEEE 141 barras

o cosseno não diminui significativamente no processo de triagem e identificação de erros, o que pode ser devido ao impacto da *cpu* na ponderação do estimador de estado desacoplado rápido aliado aos testes geométricos, devendo ser investigado mais profundamente.

Tabela 10. Erros Grosseiros Múltiplos em Medidas Retivas na EESD: Caso B2

Detecção do erro		Identificação do erro	
Medidas Suspeitas	Resíduo	Conjunto Suspeito	$\cos\theta$
z_{6-7}^R	67,8597	todas medidas suspeitas	0,9785
z_{31-141}^R	19,2827	todas medidas, exceto z_{6-7}^R	0,8527
z_{7-6}^R	31,6623	-	-
z_{141-31}^R	19,2968	-	-
z_6^R	24,0614	-	-
z_7^R	28,7362	-	-
z_{31}^R	11,6804	-	-
z_{141}^R	15,4179	-	-

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta uma metodologia para processamento de erros de topologia e erros grosseiros em medidas na formulação desacoplada da estimação de estados de sistemas elétricos de potência. O processamento de erros proposto baseia-se na combinação do uso dos resíduos normalizados com testes geométricos para detecção dos erros, seguida da formação e triagem de um conjunto suspeito de medidas e/ou pseudomedidas operacionais associadas à topologia da rede. Todo o processo de detecção e identificação é realizado de forma desacoplada conforme a natureza ativa e reativa das informações (medidas ou pseudomedidas) identificadas como suspeitas. Os resultados obtidos indicam que os testes geométricos apresentam resultados consistentes quando combinados com a formulação desacoplada do estimador de estados, quer seja adotando a modelagem barra-ramo ou a modelagem no nível de seção de barras para a rede elétrica. Além disso, diversos testes envolvendo sistemas de transmissão e sistemas de distribuição foram realizados, indicando a versatilidade da ferramenta para uso nos diferentes níveis de tensão. Ao contrário do processamento de erros tradicional, baseado no máximo resíduo normalizado, o processamento

de erros via testes geométricos elimina a necessidade de reestimação de estados sucessivas ao mesmo tempo que apresenta facilidade de implementação e baixo custo computacional. A metodologia proposta nesse trabalho alia essas características às vantagens dos métodos desacoplados, exploradas e demonstradas na literatura, com especial atenção para redução significativa do custo computacional envolvida no processo de estimação e identificação de erros. Essa redução é essencial para viabilizar o uso de ferramentas de processamento de erros na operação em tempo-real de sistemas de grande porte, como é o caso de redes de transmissão modeladas no nível de subestação e de sistemas de distribuição reais que envolvem centenas ou mesmo milhares de barras.

REFERÊNCIAS

- Abur, A. and Exposito, A.G. (2004). *Power system state estimation: theory and implementation*. CRC press.
- Alsac, O., Vempati, N., Stott, B., and Monticelli, A. (1998). Generalized state estimation. *IEEE Transactions on power systems*, 13(3), 1069–1075.
- Clements, K. and Davis, P. (1988). Detection and identification of topology errors in electric power systems. *IEEE Transactions on Power systems*, 3(4), 1748–1753.
- Clements, K.A. and Costa, A.S. (1998). Topology error identification using normalized lagrange multipliers. *IEEE Transactions on power systems*, 13(2), 347–353.
- Coelho, E.P.R., Lourenço, and Maria, E. (2012). Processamento simultâneo de erros na estimação de estados generalizada com pmus. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*.
- Dehghanpour, K., Wang, Z., Wang, J., Yuan, Y., and Bu, F. (2018). A survey on state estimation techniques and challenges in smart distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(2), 2312–2322.
- Garcia, t.A., Monticelli, A., and Abreu, P. (1979). Fast decoupled state estimation and bad data processing. *IEEE Transactions on Power apparatus and Systems*, (5), 1645–1652.
- Horisberger, H., Richard, J., and Rossier, C. (1976). A fast decoupled static state-estimator for electric power systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 95(1), 208–215.
- Lourenço, E.M., Coelho, E.P., and Pal, B.C. (2015). Topology error and bad data processing in generalized state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(6), 3190–3200.
- Lourenço, E.M., Costa, A.S., Clements, K.A., and Cernev, R.A. (2006). A topology error identification method directly based on collinearity tests. *IEEE Transactions on power systems*, 21(4), 1920–1929.
- Lourenço, E.M., Costa, A.S., and Clements, K.A. (2004). Bayesian-based hypothesis testing for topology error identification in generalized state estimation. *IEEE Transactions on power systems*, 19(2), 1206–1215.
- Lourenço, E., Clements, K., and Costa, A.S. (2002). Geometrically-based hypothesis testing for topology error identification. In *Proc. of the 14th PSCC*, 24–28. sn.
- Monticelli, A. (1999). *Power system state estimation: A generalized approach*. Kluwer Academic Publishers.
- Nogueira, E.M., Portelinha, R.K., Lourenço, E.M., Tortelli, O.L., and Pal, B.C. (2019). Novel approach to

- power system state estimation for transmission and distribution systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13(10), 1970–1978.
- Nogueira, E.M., Silva, M., Tortelli, O., and Lourenço, E.M. (2018). Estimação de estados generalizada desacoplada rápida. *Revista Espaço Energia*, (28), 10–19.
- Primadianto, A. and Lu, C.N. (2016). A review on distribution system state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(5), 3875–3883.
- Schwepe, 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.
- Tortelli, O.L., Lourenço, E.M., Garcia, A.V., and Pal, B.C. (2015). Fast decoupled power flow to emerging distribution systems via complex pu normalization. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(3), 1351–1358.
- Wu, F.F. and Liu, W.H. (1989). Detection of topology errors by state estimation (power systems). *IEEE Transactions on Power Systems*, 4(1), 176–183.