

# Estimação de Estados Generalizada via Método Desacoplado Rápido

E. M. M. NOGUEIRA\*; M. ABIDO♦, E. M. LOURENÇO\*; O. L. TORTELLI\*

\* UFPR – Universidade Federal do Paraná  
Curitiba - Brasil

♦ Copel – Companhia Paranaense de Energia  
Curitiba - Brasil

**Abstract**— Este artigo propõe a aplicação de técnicas de desacoplamento ao problema de Estimação de Estados Generalizada (EEG), que considera a modelagem da rede no nível de seção de barras. A proposta leva em conta o aumento significativo da dimensão do problema em decorrência da inclusão dos fluxos como novas variáveis de estados e da inclusão das informações de status de chaves e disjuntores como pseudomedidas. A formulação desacoplada da EEG é discutida e apresentada, demonstrando ser uma alternativa atraente para viabilizar seu uso na operação em tempo real. Um exemplo ilustrativo de 5 barras e o sistema IEEE 30 barras são utilizados para demonstrar a aplicação e viabilidade da proposta, evitando a utilização de técnicas de representação implícita das subestações em estudo.

## I. Introdução

O constante avanço da indústria de potência tem impacto direto no aumento da complexidade das análises dos sistemas elétricos, exigindo desenvolvimento de novas ferramentas de suporte e de procedimentos de automação. A forma tradicional de análise em regime permanente dos sistemas elétricos de potência baseia-se na modelagem *barra-ramo* da rede elétrica, onde os arranjos das subestações são previamente determinados e seções de barras conectadas por chaves e disjuntores fechados são agrupadas formando um único barramento. Este procedimento evita a representação de chaves e disjuntores e, conseqüentemente, os problemas numéricos associados à utilização de valores atípicos de impedância para representar a posição fechada e aberta de tais dispositivos. No entanto, no modelo barra-ramo, o arranjo das subestações e todas as informações internas das subestações são perdidas.

No início da década de 90, Monticelli e Garcia [1-2] propuseram uma solução para modelagem exata de ramos chaveáveis na formulação do problema de estimação de estados, dando origem a Estimação de Estados Generalizada [3]. Nessa nova abordagem chaves e disjuntores são explicitamente representados, mantendo a configuração da subestação na modelagem da rede e permitindo tanto a utilização das informações internas das subestações modeladas, tais como medidas de fluxo de potência, como o processamento mais eficiente de erros na topologia da rede [4], [5], [6].

A principal dificuldade associada a essa modelagem detalhada da rede elétrica é o aumento expressivo da dimensão do problema, que passa a incluir os fluxos de

potência ativa e reativa através de todas as chaves e disjuntores, bem como as tensões complexas nas seções de barra, como novas variáveis de estado. Além disso, as informações referentes aos status desses dispositivos são incluídas como novas equações do problema de estimação de estados.

O aumento da dimensão do problema é apontado na literatura como um inconveniente para a nova abordagem. Nesse sentido, em [15], os autores propõem o uso da estimação de estados em dois estágios, a qual adota a modelagem barra-ramo da rede no primeiro estágio e a modelagem no nível de seção de barras, no segundo estágio. O segundo estágio contempla apenas algumas subestação pré-selecionadas para modelagem detalhada, contornando o problema da dimensão. No entanto, essa abordagem requer métodos eficientes de determinação da região suspeita para o sucesso de seu uso no processamento de erros. Outra abordagem, proposta em [6], é baseada na teoria de grafos e propõe uma representação implícita capaz de reduzir o processamento de redes modeladas no nível de subestação.

Tendo em vista as reais preocupações relacionadas ao alto custo computacional da EEG, esse artigo propõe uma nova abordagem para a sua formulação, baseada nos métodos desacoplados de estimação de estados. A extensão proposta da formulação do estimador de estados desacoplado permite aliar o processamento de redes modeladas no nível de seção de barras com o alto desempenho computacional dos métodos desacoplados.

Um exemplo ilustrativo é explorado nesse artigo para demonstrar a viabilidade da abordagem proposta. Resultados de simulações envolvendo o sistema teste IEEE 30 barras reforçam a aplicabilidade da nova ferramenta.

## II. Estimação de Estados pelo Método Desacoplado Rápido

Esta seção descreve os fundamentos básicos do estimador desacoplado, familiarizando, assim, o leitor com a formulação do problema e com a notação utilizada na extensão proposta neste artigo e apresentada na Seção III.

A estimação de estados visa obter as tensões complexas em todas as barras, ou seja, obter as variáveis de estado do sistema. Na formulação clássica,

proposta inicialmente em [7], as estimativas para o vetor de estados que melhor se ajustam ao modelo de medição são determinadas através da minimização da soma ponderada dos quadrados dos resíduos, sendo os resíduos definidos por:

$$r_m = z_m - h_m(\hat{x}) \quad (1)$$

onde:

$z_m$ : vetor ( $N_m \times 1$ ) de quantidades medidas;

$h_m(\cdot)$ : vetor ( $N_m \times 1$ ) de funções não lineares que relaciona as quantidades medidas às variáveis de estado  $x$ ;

$\hat{x}$  – vetor de estados estimados.

Utilizando-se então o método dos mínimos quadrados ponderados, a estimativa para os valores dos estados é obtida minimizando-se a função objetivo representada por:

$$J(\hat{x}) = [z_m - h_m(\hat{x})]^T R_m^{-1} [z_m - h_m(\hat{x})] \quad (2)$$

onde:

$R_m$ : é a matriz ( $N_m \times N_m$ ) de covariância dos erros de medição.

A solução do problema representado pela Eq. (2) pode ser obtida resolvendo-se iterativamente o seguinte sistema linear:

$$(H^T R^{-1} H) \Delta \hat{x} = H^T R^{-1} (z - h(\hat{x})) \quad (3)$$

onde:

$G = H^T R^{-1} H$ : matriz de ganho;  $H = \frac{\partial h(x)}{\partial x}$ : matriz

Jacobiana;  $R$ : matriz de covariância das medidas;

$z$ : vetor de medidas.

A exemplo do que ocorreu com a formulação do problema de fluxo de potência, o desacoplamento PΘ-QV, presentes na rede básica de transmissão, foram explorados nos estudos de estimação de estado. O método parte do princípio de que os elementos da matriz ganho obtidos a partir da partida plana são próximos aos elementos da matriz obtida com a solução convergida, comprovando-se assim a efetividade da adoção de matrizes constantes (matriz de ganho G ou matriz Jacobiana H) no processo de solução. O estimador desacoplado rápido, proposto em [13], propõe ainda a separação do problema em duas partes: ativa (denotada pelo subscrito P) e reativa (denotada pelo subscrito Q), acentuando a melhoria na redução do tempo computacional dos métodos desacoplados.

Para a resolução do problema de estimação de estados através do método desacoplado rápido, supõe-se que o vetor de quantidades medidas seja particionado, de forma que:

$$z_m = \begin{bmatrix} z_m^P \\ z_m^Q \end{bmatrix}, \text{ com } z_m^P = \begin{bmatrix} t \\ p \end{bmatrix} \text{ e } z_m^Q = \begin{bmatrix} u \\ q \\ V \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde:

$t, p, u, q$  e  $V$ , são os vetores de medida de fluxo de potência ativa e reativa, de injeção de potência ativa e reativa e de magnitude de tensão nas barras, respectivamente.

Considerando o desacoplamento, a matriz de covariância é representada por:

$$R = \begin{bmatrix} R_P & 0 \\ 0 & R_Q \end{bmatrix} \quad (5),$$

e a matriz Jacobiana, por:

$$H(V, \theta) = \begin{bmatrix} H_{PP} & 0 \\ 0 & H_{QQ} \end{bmatrix} \quad (6)$$

A matriz ganho correspondente pode ser representada por:

$$G = \begin{bmatrix} G_{PP} & 0 \\ 0 & G_{QQ} \end{bmatrix} \quad (7)$$

onde:

$$G_{PP} = H_{PP}^T R_P^{-1} H_{PP} \text{ e } G_{QQ} = H_{QQ}^T R_Q^{-1} H_{QQ}$$

O sistema a ser resolvido a cada iteração para a obtenção dos estados é dado por:

$$G \Delta \hat{x} = T \quad (8)$$

onde:

$$T = \begin{bmatrix} H_{PP}^T R_P^{-1} \Delta z_P \\ H_{QQ}^T R_Q^{-1} \Delta z_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_P \\ T_Q \end{bmatrix},$$

$$\Delta z_P = \frac{\Delta z_P}{V}; \Delta z_Q = \frac{\Delta z_Q}{V}; \Delta z_P = z_P - h_P(\hat{x}); \Delta z_Q = z_Q - h_Q(\hat{x});$$

A estimação de estados desacoplada rápida descrita acima considera a modelagem barra-ramo da rede. A próxima seção apresenta a extensão proposta dessa formulação, tornando-a capaz de processar redes modeladas no nível de seção de barras.

### III. Estimação de Estados Generalizada Desacoplada - EEGD

#### A. Extensão dos vetores de estado e vetores de medida

Este artigo propõe o uso da representação de chaves e disjuntores (*ramos chaveáveis*), proposta em [1-2], na formulação desacoplada do estimador de estados, de forma a torná-lo capaz de processar redes modeladas no nível de seção de barras. Conforme proposto na literatura [1-8], a modelagem detalhada da rede no nível de seção de barras é obtida através da inclusão dos fluxos de potência através dos disjuntores como novas variáveis de estado juntamente com as tensões complexas nodais. Considerando a abordagem desacoplada, o vetor de estados estendido é particionado, seguindo a natureza ativa e reativa das variáveis de estado, ou seja:

$$x^{\text{est}} = \begin{bmatrix} x^P \\ x^Q \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\text{sendo: } x^P = [\theta^T \ t^T]^T \text{ e } x^Q = [V^T \ u^T]^T \quad (10)$$

onde  $V$  e  $\theta$  são os vetores de magnitude e fase das tensões nas barras, respectivamente, e  $t$  e  $u$  são os vetores de fluxo de potência ativa e reativa através dos disjuntores, respectivamente.

Seguindo a modelagem da rede no nível de

subestação, as informações (ou medidas digitais) a respeito dos status dos disjuntores são incluídas na formulação do problema de estimação de estados como pseudomedidas ou *pseudomedidas operacionais*, em alusão ao termo *restrição operacional* comumente encontrado na literatura da área. Portanto, se um ramo chaveável conectado entre os nós  $i$  e  $j$  está fechado, a diferença de potencial e a abertura angular através deste dispositivo são nulas, ou seja,  $\theta_i - \theta_j = 0$  e  $v_i - v_j = 0$ . Por outro lado, se o dispositivo estiver aberto, os fluxos de potência ativa e reativa através dele são nulos, ou seja,  $t_{ij} = 0$  e  $u_{ij} = 0$ .

Enquanto a modelagem no nível de subestação estende o vetor de medidas  $z$ , de forma a contemplar medidas convencionais e as pseudomedidas/restrições operacionais de disjuntores fechados e abertos, mencionadas acima, a abordagem desacoplada proposta neste trabalho, agrupa essas informações de acordo com sua natureza ativa ou reativa, ou seja:

$$z^{est} = \begin{bmatrix} z_m^P \\ z_o^Q \end{bmatrix}, \text{ com } z_o = \begin{bmatrix} z_m^P \\ z_o^Q \end{bmatrix} \quad (11)$$

Considerando o particionamento das medidas convencionais, definidos em (3), e a partição acima, relativa às informações operacionais, temos que:

$$z_P = \begin{bmatrix} z_m^P \\ z_o^P \end{bmatrix} \text{ e } z_Q = \begin{bmatrix} z_m^Q \\ z_o^Q \end{bmatrix} \quad (12)$$

onde:

$z_o^P$  são as informações ativas a respeito dos disjuntores (diferença angular nula ou fluxo de potência ativa nula para disjuntor fechado ou aberto, respectivamente) e  $z_o^Q$  são as informações reativas a respeito dos disjuntores (diferença de potencial nula ou fluxo de potência reativa nula para disjuntor fechado ou aberto, respectivamente).

Finalmente, a modelagem no nível de seção de barras requer a revisão das funções que relacionam as medidas de injeções de potência e os estados de forma que possam contemplar as novas variáveis de estado. A injeção em uma barra  $k$  pode ser expressa como a soma dos fluxos de potência através dos ramos incidentes a essa barra. Nesse somatório, os fluxos de potência através de ramos convencionais (linhas de transmissão e transformadores) são expressos em função de seus parâmetros e das tensões complexas nos nós terminais destes ramos. No entanto, os fluxos de potência através de disjuntores devem ser expressos diretamente em função das novas variáveis de estado. Assim, as funções não lineares que relacionam as medidas injeções de potência ativa e reativa podem com os estados são definidas por:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) + \sum_{l \in \Gamma_k} t_{kl} \quad (13)$$

$$Q_k = -Q_k^{sh}(V_k) + \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) + \sum_{l \in \Gamma_k} u_{kl} \quad (12)$$

onde:

$\Omega_k$ : conjunto de barras conectadas a barra  $k$  através de ramos convencionais;

$\Gamma_k$ : conjunto de barras conectadas a barra  $k$  através de ramos chaveáveis.

Naturalmente, medidas de injeção de potência ativa estarão contidas no conjunto de medidas ativas  $z_m^P$  e medidas de injeção de potência reativa estarão contidas no conjunto de medidas reativas  $z_m^Q$ .

Juntamente com as medidas de injeção de potência ativa e reativa, tem-se representadas pelas equações em (13) as restrições de injeção nula em barras de passagem ou barras de injeção nula, comumente encontradas no interior das subestações e, portanto, comuns na modelagem no nível de seção de barras abordada nesse trabalho. Essas informações podem ser incluídas no problema de EEG como pseudomedidas, aqui chamadas *pseudomedidas estruturais*, em alusão ao termo *restrições estruturais* normalmente encontrado na literatura.

### B. Solução pelo Método Desacoplado Rápido

O vetor de medidas estendido adequado às técnicas de desacoplamento, passa a ser representado por:

$$z_m^P = \begin{bmatrix} t \\ p \end{bmatrix} \text{ e } z_m^Q = \begin{bmatrix} u \\ q \\ V \end{bmatrix} \quad (143)$$

$$z_o^P = \begin{bmatrix} \theta_d \\ t_d \end{bmatrix} \text{ e } z_o^Q = \begin{bmatrix} V_d \\ u_d \end{bmatrix} \quad (15)$$

onde:

$\theta_d = 0$ : restrição de diferença angular nula para disjuntor fechado;  $v_d = 0$ : restrição de diferença potencial nulo para disjuntor fechado;  $t_d = 0$ : restrição de fluxo de potência ativa nula para disjuntor aberto;  $u_d = 0$ : restrição de fluxo de potência reativa nula para disjuntor aberto.

A partição da matriz Jacobiana do problema de EEG, que leva em conta as novas variáveis de estado e as informações operacionais dos disjuntores é realizada de acordo com a natureza das informações e das variáveis de estado, conforme descrito em (16):

$$H_{PP} = \begin{bmatrix} \frac{\partial t}{\partial \theta} & \frac{\partial t}{\partial t} \\ \frac{\partial p_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial p_{inj}}{\partial t} \\ \frac{\partial \theta_d}{\partial \theta} & \frac{\partial \theta_d}{\partial t} \\ \frac{\partial t_d}{\partial \theta} & \frac{\partial t_d}{\partial t} \end{bmatrix}; H_{PQ} = \begin{bmatrix} \frac{\partial t}{\partial V} & \frac{\partial t}{\partial u} \\ \frac{\partial p_{inj}}{\partial V} & \frac{\partial p_{inj}}{\partial u} \\ \frac{\partial V_d}{\partial V} & \frac{\partial V_d}{\partial u} \\ \frac{\partial t_d}{\partial V} & \frac{\partial t_d}{\partial u} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$H_{QP} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \theta} & \frac{\partial u}{\partial t} \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{inj}}{\partial t} \\ \frac{\partial V_d}{\partial \theta} & \frac{\partial V_d}{\partial t} \\ \frac{\partial u_d}{\partial \theta} & \frac{\partial u_d}{\partial t} \end{bmatrix}; H_{PQ} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial V} & \frac{\partial u}{\partial u} \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial V} & \frac{\partial Q_{inj}}{\partial u} \\ \frac{\partial V_d}{\partial V} & \frac{\partial V_d}{\partial u} \\ \frac{\partial u_d}{\partial V} & \frac{\partial u_d}{\partial u} \end{bmatrix} \quad (17)$$

onde:  $H_{PP}$  é a matriz Jacobiana das equações do problema ativo em relação às variáveis de estado do problema ativo;  $H_{QP}$  a matriz Jacobiana das equações do problema reativo em relação às variáveis de estado do problema ativo;  $H_{PQ}$  a matriz Jacobiana das equações do problema ativo em relação às variáveis de estado do problema reativo e  $H_{QQ}$  a matriz Jacobiana das equações do problema reativo em relação às variáveis de estado do problema reativo.

Dessa forma, a matriz Jacobiana estendida proposta nesse trabalho pode ser escrita por:

$$H = \begin{bmatrix} H_{PP}^m & H_{PQ}^m \\ H_{PP}^o & H_{PQ}^o \\ H_{QP}^m & H_{QQ}^m \\ H_{QP}^o & H_{QQ}^o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{PP} & H_{PQ} \\ H_{QP} & H_{QQ} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Já a matriz covariância R do problema estendido é dada por:

$$R = \begin{bmatrix} R_P^m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_P^o & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_Q^m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_Q^o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_P & 0 \\ 0 & R_Q \end{bmatrix} \quad (19)$$

De acordo com a definição da matriz Ganho, vide Eq. (3), e com as definições acima acerca da matriz Jacobiana estendida, a matriz ganho G da EEG desacoplada, pode ser representada por:

$$G = \begin{bmatrix} H_{PP}^T R_P^{-1} H_{PP} & H_{PQ}^T R_Q^{-1} H_{PQ} \\ H_{QP}^T R_P^{-1} H_{QP} & H_{QQ}^T R_Q^{-1} H_{QQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{PP} & G_{PQ} \\ G_{QP} & G_{QQ} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Cabe ressaltar que as informações dos status dos disjuntores são equações lineares. Dessa forma, os blocos da matriz Jacobiana podem ser representados por:

$$H_{PP} = \begin{bmatrix} \frac{\partial t}{\partial \theta} & 0 \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial \theta} \\ 0 \\ \pm 1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{cases} 0 \\ \pm 1 \\ 0 \\ 0 \\ \pm 1 \end{cases} \quad \text{e} \quad H_{PQ} = \begin{bmatrix} \frac{\partial t}{\partial V} & 0 \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial V} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$H_{QP} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \theta} & 0 \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial \theta} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad H_{PQ} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial V} & 0 \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial V} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{cases} 0 \\ \pm 1 \\ 0 \\ \pm 1 \end{cases} \quad (21)$$

É possível observar que os blocos  $H_{PQ}$  e  $H_{QP}$  são compostos por uma grande quantidade de valores nulos, em especial no que se refere às novas informações oriundas dos status de chaves e disjuntores. Somados ao desacoplamento natural dos sistemas de transmissão, no processo de obtenção da matriz ganho, G, representadas em (20), observa-se que as matrizes  $G_{PQ}$  e  $G_{QP}$  são bem menos significantes que as matrizes diagonais  $G_{PP}$  e  $G_{QQ}$ . Assim, verifica-se que a extensão do problema de estimação no nível de seção de barras não deteriora o processo de aproximações adotadas no estimador de estados desacoplados convencional, de forma que a matriz de ganho pode igualmente ser representada por:

$$G = \begin{bmatrix} H_{PP}^T R_P^{-1} H_{PP} & 0 \\ 0 & H_{QQ}^T R_Q^{-1} H_{QQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{PP} & 0 \\ 0 & G_{QQ} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Dessa forma, comprova-se que o problema de estimação de estados generalizada pode ser resolvido pelo algoritmo desacoplado [13], [14], discutido na Seção 2.

## IV. Aplicações da EEGD

### 4.1 Exemplo Simbólico

O sistema teste representado pela Fig. 1 é utilizado nessa seção para ilustrar vetores e matrizes associados ao EEGD.

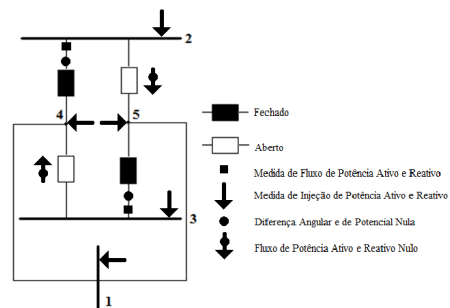


Fig 1: Sistema teste ilustrativo

Considerando a abordagem desacoplada, o conjunto de medidas ilustradas na Fig. 1, as novas variáveis de estado, conforme descrito em (10), as pseudomedidas operacionais relativas aos status dos disjuntores  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  e  $D_4$ , descritos por (11) e (12), e as pseudomedidas estruturais de injeção nula nas barras 4 e 5, modeladas conforme (13), tem-se as seguintes matrizes  $H_{PP}$  e  $H_{QQ}$ :

$$H_{PP} = \begin{matrix} t_{24} \\ t_{35} \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ \theta_{24} \\ \theta_{35} \\ t_{25} \\ t_{34} \end{matrix} \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 & \theta_5 & t_{24} & t_{25} & t_{34} & t_{35} \\ 0 & * & 0 & * & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & * & * & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ * & 0 & 0 & * & * & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ * & 0 & 0 & * & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ * & 0 & 0 & 0 & * & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (a)$$

$$H_{QQ} = \begin{matrix} u_{24} \\ u_{35} \\ Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \\ V_{24} \\ V_{35} \\ u_{25} \\ u_{34} \end{matrix} \begin{bmatrix} V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 & u_{24} & u_{25} & u_{34} & u_{35} \\ 0 & * & 0 & * & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & * & * & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ * & 0 & 0 & * & * & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ * & 0 & 0 & * & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ * & 0 & 0 & 0 & * & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (b)$$

onde “\*” indicam valores diferentes de 0 e 1.

As matrizes  $G_{PP}$  e  $G_{QQ}$  podem ser obtidas a partir de (22) e o algoritmo tradicional [13], [14] pode ser aplicado para obtenção dos estados da rede, que incluem os fluxos de potência ativa (reativa), juntamente com os ângulos (magnitudes) das tensões a partir da resolução do problema ativo (reativo) do estimador de estados desacoplado no nível de subestação.

O algoritmo tradicional, encontrado em [14], foi utilizado como base para desenvolvimento da formulação. Inicia-se o processo em condições de partida plana ( $V = 1$  pu e  $\Theta = 0^\circ$ ) para calcular a matriz ganho (G) através das matrizes Jacobiana (H) e de covariância (R). Em seguida, calcula-se também a matriz T através da matriz Jacobiana (H), de covariância (R) e a diferença entre o vetor de medida (z) e as equações que relacionam as quantidades medidas aos estados (h(x)). A partir disso, calcula-se o vetor de estados atualizado considerando o problema ativo e reativo. Em caso de convergência, o processo se encerra. Caso contrário, reinicia-se o processo a partir do cálculo da matriz ganho (G) com os dados atualizados até que a convergência seja atingida.

#### 4.2 Sistema Teste IEEE 30 barras

A partir da formulação proposta neste artigo, desenvolveu-se um programa computacional em MATLAB e o Sistema Teste IEEE 30 barras foi utilizado. Para esse sistema teste, escolheu-se modelar as barras 12 e 15 no nível de seção de barras, como adotado em outras referências ([4] e [5], por exemplo) passando o sistema a conter 41 barras, conforme apresentado na Fig. 2.

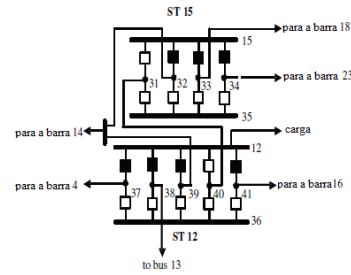


Fig 2: Modelagem no nível de subestação para as barras 12 e 15 do Sistema Teste IEEE 30 barras

Obtiveram-se os dados estimados do sistema, isto é, módulo e ângulo das tensões nas barras e fluxos de potência ativa e reativa nos disjuntores. A Tabela 1 mostra os valores estimados das tensões internas das subestações 12 e 15.

TABELA I  
VALORES ESTIMADOS DAS TENSÕES COMPLEXAS NAS SEÇÕES DE BARRA DAS SES

Barra	Tensão (pu)	Ângulo (graus)
Subestação 12		
12	1.023	-16.516
37	1.023	-16.516
38	1.023	-16.516
39	1.023	-16.516
40	1.000	0.000
41	1.023	-16.516
Subestação 15		
15	0.938	-18.954
31	1.000	0.000
32	0.938	-18.954
33	0.938	-18.954
34	0.938	-18.954
35	1.000	0.000

Em relação a subestação 12, os dados estimados para as barras 37, 38, 39 e 41 foram os mesmos da barra 12, e conforme pode-se observar na Fig. 2, os disjuntores presentes entre essas barras e a barra 12 estão fechados, justificando o resultado obtido. Da mesma forma, o disjuntor situado entre a barra 40 e a barra 12 encontra-se aberto, e por isso, os dados estimados se diferem. A mesma observação pode ser feita para a subestação 15. Segundo a Fig. 2, os disjuntores situados entre a barra 15 e as barras 32, 33 e 34 estão fechados, não havendo diferença de potencial entre elas em módulo ou ângulo. Já os disjuntores encontrados entre as barras 31 e 35 e a barra 15 encontram-se abertos.

As estimativas para os fluxos de potência ativa e reativa através dos disjuntores são mostrados na Tabela II. Para a subestação 12, observa-se claramente que o fluxo de potência ativo e reativo em disjuntores abertos (36-37 e 12-40) são nulos, como esperado. Já em relação aos fechados (12-37 e 12-41), observa-se que há fluxo de potência fluindo nos disjuntores. A mesma observação se estende à subestação 15.

TABELA II  
FLUXO DE POTÊNCIA NOS DISJUNTORES

Disjuntor	Fluxo de Potência
Subestação 12	
12 - 37	-39.923+j9.521
36 - 37	0.000+j0.000
12 - 40	0.000+j0.000
12 - 41	10.649+j8.518
Subestação 15	
15 - 31	0.000+j0.000
15 - 32	-10.972-j6.562
15 - 34	0.769+j0.521
34 - 35	0.000+j0.000

Assim, a eficiência do método é comprovada. Além da estimação correta dos estados convencionais, a ferramenta fornece estimativas coerentes para os fluxos de potência através dos disjuntores, de acordo com seus status (fechado e aberto).

## V. Conclusões

Este artigo demonstra que a natureza das novas variáveis de estado e do novo elenco de eventuais medidas e pseudomedidas, decorrentes da modelagem da rede no nível de seção de barras, são passíveis de desacoplamento. O trabalho demonstra a viabilidade e os desdobramentos da aplicação das técnicas de desacoplamento adotadas nos estudos tradicionais de estimação de estado à EEG.

A extensão proposta para a formulação do estimador de estados desacoplado permite aliar o processamento de redes modeladas no nível de seção de barras com o alto desempenho computacional dos métodos desacoplados, evitando a necessidade da representação implícita para as subestações ou resolução da EEG em dois estágios. Dessa forma, a EEGD se apresenta como uma alternativa atraente para viabilizar sua aplicação à operação em tempo real.

A estrutura da matriz Jacobiana da EEGD proposto é ilustrada através de um exemplo simbólico, enquanto resultados de simulações com o sistema IEEE 30 barras comprovam a eficácia da metodologia proposta.

## Referências

- [1] A. Monticelli, A. Garcia. "Modeling Zero Impedance Branches in Power Systems State Estimation". *IEEE/PES Winter Meeting*, 8(1):364-370, Jan. 1991.
- [2] A. Monticelli. "The Impact of Modeling Short Circuits Branches in State Estimation". *IEEE Trans. On Power Systems*, 8(1):364-370, Feb 1993.
- [3] O. Alsaç, N. Vempati, B. Stott, A. Monticelli. "Generalized State Estimation". *IEEE Trans. on Power Systems*, 13(3):1069-1075, August, 1998.
- [4] K. A. Clements, A. J. Simões Costa. "Topology Error Identification using Normalized Lagrange Multipliers". *IEEE Trans. on Power Systems*, 13(2):347-353, May 1998.
- [5] E. M. Lourenço, A. Simões Costa, K. A. Clements, R. A. Cernev. "A Topology Error Identification Method Directly Based on Co linearity Tests". *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.21, pp. 1920-1929, Nov. 2006.
- [6] A. de la Villa Jaén, A. Gómez-Expósito. "Implicitly Constrained Substation Model for State Estimation". *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.17, pp. 850-856, Aug. 2002.

[7] G. N. Korres, P. J. Katsikas. "Identification of Circuit Breaker Statuses in WLS State Estimator". *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.17, pp. 818-825, Aug. 2002.

[8] E. M. Lourenço, R. Ribeiro Pinto Jr., A. J. A. Simões Costa. "Power Flow at Substation Level Using Newton-Raphson's Method". *X Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning*, SP-068, May 2006.

[9] J. N. Wrubel, P.S. Rapciński, K. L. Lee, B. S. Gisin, G. W. Woodzell. "Practical Experience with Corrective Switching Algorithm for On-line Applications". *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.11, pp. 415-421, Feb. 1996.

[10] A.A. Mazi, B. F. Wollenberg, M. H. Hesse. "Corrective Control of Power System Flows by Line and Bus-bar Switching". *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. PWRS-1, No.3, pp. 258-265, Aug. 1986.

[11] B. Stott, O. Alsac. "Fast Decoupled Load Flow". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-93, Issue 3, pp. 859 - 869, May 1974.

[12] F. C. Schweppe, J. Wildes e D. B. Rom, "Power System Static-State Estimation". *IEEE Transactions Power Apparatus. System*, vol. PAS-89, no. 1, pp. 120-125, 1970.

[13] H. P. Horisberger, J. C. Richard e C. Rossier, "A Fast Decoupled Static State-Estimator for Electric Power Systems". *IEEE Transactions Power Apparatus. System*, vol. PAS-95, no. 1, pp. 208-215.

[14] A. Abur, A. Gómez Expósito, "Power System State Estimation: Theory and Implementation". New York, NY: CRC Press, Taylor & Francis, 2004. 327 p.

[15] A. Abur, H. Kim, and M. K. Celik. "Identifying the Unknown Circuit Breaker Statuses in Power Networks". *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(4):2029-2037, Nov. 1995.

## Biografias

**Ellen M. M. Nogueira** recebeu seu diploma de graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil, em 2012, e de mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Paraná, Brasil, em 2014. Atualmente, está estudando para alcançar o diploma de doutorado pela Universidade Federal do Paraná. Os seus interesses estão focados à área de métodos computacionais para operação de sistemas elétricos de potência.

**Mônica Abido** recebeu seu diploma de graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil, em 2006. Atualmente, está estudando para alcançar o diploma de mestrado pela Universidade Federal do Paraná. Os seus interesses estão focados à área de métodos computacionais para operação de sistemas elétricos de potência.

**Elizete M. Lourenço (M'02)** recebeu seu diploma de graduação em Engenharia Elétrica, assim como seu mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, em 1992, 1994 e 2001, respectivamente. Desde 1995 é membro docente do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. Seus interesses de pesquisa estão relacionados à área de métodos computacionais para análise e operação de sistemas de potência com ênfase em estimação de estados.

**Odilon L. Tortelli** recebeu seu diploma de graduação e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, em 1992 e 1994, respectivamente, e seu diploma de doutorado pela Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, em 2010. Desde 1995 é membro docente do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. Seus interesses de pesquisa estão relacionados à área de métodos computacionais para operação e controle de sistemas elétricos de potência.