

# Fast decoupled generalized state estimation

## Estimação de estados generalizada desacoplada rápida

Ellen M. M. Nogueira<sup>1</sup>  
Monica A. B. C. da Silva<sup>1,2</sup>  
Elizete M. Lourenço<sup>1</sup>  
Odilon L. Tortelli<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

ellen.nogueira@ufpr.br  
elizete@eletrica.ufpr.br  
odilon@eletrica.ufpr.br

<sup>2</sup>COPEL Distribuição S. A.  
monica.abido@copel.com

**Abstract:** This paper proposes the application of decoupling techniques to the Generalized State Estimation (GSE). The representation of switches and circuit breakers, and the use of measurements in the internal devices of the substation, made possible by the GSE, promote an extended estimation of the state variables and its corresponding operational condition. However, this representation implies a significant increase in the size of the problem and, consequently, in the required computational time. The decoupling formulation proposed in this work alleviate the computational burden, enabling real time application of GSE. The paper describes in detail the proposed formulation. Results involving the IEEE 14 bus test system, modelled at the bus section level, as well as a real test system based on the 69-230kV electrical system (Copel) that serves the region of Curitiba, demonstrate the feasibility and efficiency of the proposed approach.

**Keywords:** State estimation, fast decoupled method, bus section level network modelling.

**Resumo:** Este artigo propõe a aplicação de técnicas de desacoplamento à Estimação de Estado Generalizada (EEG). A representação de chaves e disjuntores, bem como o uso de medições nos dispositivos internos das subestações, possibilitados pela EEG, permitem uma estimativa ampliada das variáveis de estado e sua correspondente condição operacional. No entanto, essa representação implica um aumento significativo no tamanho do problema e no tempo

computacional necessário. A formulação desacoplada proposta neste trabalho alivia a carga computacional, permitindo a aplicação em tempo real da EEG. O artigo descreve em detalhes a formulação proposta. Resultados de simulações envolvendo o sistema teste IEEE 14 barras, modelado no nível de seção de barras, assim como um sistema teste real baseado no sistema elétrico de 69-230kV da Copel que atende a região de Curitiba, demonstram a viabilidade e eficiência da abordagem proposta.

**Palavras-Chave:** Estimação de estados, método desacoplado rápido, modelagem no nível de subestação.

### 1 Introdução

A estimação de estados em sistemas de potência (EESP) fornece a melhor aproximação possível dos estados da rede, as magnitudes e ângulo das tensões nas barras, a partir do processamento do conjunto de dados e medidas disponíveis. Os centros de controle recebem um conjunto redundante de telemedidas realizadas ao longo da rede, as quais podem conter erros devido a falhas nos canais de comunicação ou nos equipamentos de medição. O processo estatístico envolvido na EESP permite detectar, identificar e eliminar esses erros, fornecendo ao operador uma base de dados mais confiável para tomada de decisões na operação em tempo real. Desde sua proposição inicial [1], a formulação da EESP tem sido aprimorada para acompanhar a contínua evolução do setor elétrico. Embora inicialmente proposta para sistemas de transmissão, o uso crescente das tecnologias *Smart Grid* e a disseminação da geração distribuída ampliam a controlabilidade, a complexidade da operação e a quantidade de informações a serem processadas, impulsionando a aplicação da estimação de estados para todos os níveis de tensão do sistema elétrico.

A formulação tradicional da EESP é baseada na representação barra-ramo da rede elétrica, onde as informações das posições de chaves e disjuntores são pré-processadas pelo configurador de rede. Esse modelo simplificado evita a representação explícita desses dispositivos de chaveamento e os problemas numéricos decorrentes do uso de valores atípicos de impedância para representar suas posições aberta/fechada. No entanto, a modelagem barra-ramo implica consequências indesejáveis para fins de estimação do estado: os arranjos internos das subestações e as medidas disponíveis em seus equipamentos internos são perdidos, diminuindo a redundância do conjunto de medição e, conseqüentemente, a capacidade de processamento de erros de modelagem.

A incorporação exata de chaves e disjuntores na formulação da EESP foi proposta na década de 1990 [2] [3] [4] [5]. Essa nova abordagem permite a representação das configurações das subestações sem a ocorrência dos problemas numéricos mencionados. Esse processo deu origem à chamada Estimação de Estado Generalizada (EEG) [5]. As vantagens da representação detalhada da rede não se restringem à disponibilidade de medições internas das subestações, inevitavelmente negligenciadas na abordagem barra-ramo, mas também permitem um tratamento mais adequado e simultâneo de erros de medida analógicas e digitais. Assim, ao contrário da estimação de estados convencional, onde a

topologia da rede é assumida correta, a EEG admite que tanto a topologia como as medidas estão sujeitas a erros, evitando que eventuais erros na topologia possam ser equivocadamente interpretados como erros grosseiros em medidas analógicas, e vice-versa, o que levaria o estimador a desprezar informações corretas, comprometendo a estimativa dos estados da rede. A superioridade da EEG no processamento de erros tem sido explorada e já originou uma nova série de algoritmos de processamento de erros simultâneos em medida e erros de topologia [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13], possibilitando uma operação mais segura da rede.

A eficácia do EEG e sua habilidade no processamento de erros vem sendo certificada e relatada na literatura técnica da área [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13]. No entanto, a representação da rede no nível de subestação (ou nível de seção de barra) aumenta significativamente a dimensão do problema de estimação de estados. Isso se deve ao fato de que na EEG o fluxo de potência ativa e reativa através dos dispositivos chaveáveis (chaves e disjuntores), bem como a tensão complexa em cada seção de barra das subestações são incluídos como novas variáveis de estado [2] [3] [4] [5]. Essa representação mais detalhada da rede tem um impacto significativo no aumento do tempo computacional da EEG, tornando proibitivo representar todas as subestações no nível de seção de barras [2] [3] [4].

Relevantes esforços foram apresentados na literatura para lidar com a desvantagem da modelagem da rede no nível de seção de barras. Depois de propor e avaliar o impacto da representação detalhada da rede na EESP [2] [3], os mesmos autores propõem uma estratégia de dois estágios para evitar que todas as subestações sejam modeladas em detalhe, reduzindo assim o esforço computacional da EEG [4]. Em tal abordagem, o modelo de barramento tradicional (barra-ramo) é adotado na primeira etapa. O segundo estágio é acionado apenas se erros de modelagem forem detectados. Dessa forma, o segundo estágio trabalha com uma rede reduzida onde as subestações suspeitas são modeladas no nível da seção de barras. Diferentes métodos de processamento de erros, incluindo vários algoritmos dedicados ao processamento de erros de topologia, aplicam a estimação em dois estágios [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13]. No entanto, o sucesso dessas metodologias depende da eficiência do primeiro estágio em determinar a região suspeita da rede, a qual deve conter todas as fontes de inconsistência dos erros [14], o que nem sempre é possível garantir [14] [15]. A abordagem apresentada em [9] e [16] utiliza a teoria de grafos para determinar um modelo reduzido para as configurações das subestações. O modelo evita a representação explícita de todos os elementos chaveáveis, resultando em um problema de estimação de estados minimamente aumentado em que as restrições topológicas são implicitamente consideradas. O modelo reduz o tempo computacional da EEG, porém a relação direta entre o modelo físico da rede elétrica e a representação da rede na formulação do problema é perdida. Em [17], os autores propõem uma aplicação local da EEG que permite uma representação trifásica das subestações, onde todas as medidas possíveis são levadas em consideração, melhorando a redundância local. O EEG é

resolvido localmente e os resultados reportados ao EMS (*Energy Management System*). A desvantagem nesse caso está no particionamento da EEG, que passa a ser individualizada para cada subestação, impossibilitando o processamento da rede elétrica como um todo, o que pode dificultar o processamento de erros e o aproveitamento da redundância das informações.

Este artigo vem se somar aos esforços acima destacados na busca pela redução do esforço computacional da EEG. A abordagem proposta está centrada na aplicação das conhecidas técnicas de desacoplamento PO-QV para reduzir o tempo computacional associado a representação da rede no nível de seção de barras. Diferentemente da formulação tradicional do estimador desacoplado rápido [18] [19], onde o modelo barra-ramo é adotado, a abordagem proposta neste artigo permite a representação explícita dos elementos chaveáveis e o uso das medidas internas das subestações.

A formulação proposta aproveita as características das novas variáveis de estado e a linearidade das equações operacionais, incluídas para representar o *status* dos dispositivos chaveáveis. O artigo apresenta em detalhes a formulação desacoplada da EEG e demonstra que a nova abordagem não requer qualquer simplificação adicional para incorporar a nova modelagem da rede. Isso significa que a EEG desacoplada proposta, a partir de agora referida como EEG-DR, mantém o desempenho e precisão comprovados em [18] e [19].

O artigo está organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta a estimação de estados desacoplada tradicional, que serve de base para a abordagem proposta. A Seção 3 descreve detalhadamente o impacto da aplicação das técnicas de desacoplamento à formulação estendida da estimação de estado, dando origem à EEG-DR proposta. As seções 4 e 5 apresentam os resultados e conclusões, respectivamente.

## 2 Estimação de Estados Desacoplada Tradicional

Esta seção apresenta os principais conceitos e a formulação da estimação de estados tradicional e sua formulação desacoplada, onde o modelo barra-ramo da rede elétrica é adotado. Contém, portanto, os fundamentos da abordagem proposta, que é apresentada na Seção 3.

### 2.1 Formulação básica

Considere-se uma rede elétrica com  $N_b$  barras e  $N_m$  medidas, onde os parâmetros da configuração barra-ramo são conhecidos. A solução do problema de EE pelo método dos mínimos quadrados pode ser obtida minimizando a seguinte função objetivo:

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

onde  $\mathbf{z}_m$  é o vetor ( $N_m \times 1$ ) das quantidades medidas;  $\mathbf{h}(\cdot)$  é o vetor ( $N_m \times 1$ ) de funções não lineares que relacionam as quantidades medidas dos estados;  $\hat{\mathbf{x}}$  é o vetor ( $n \times 1$ ) dos estados estimados composto pelas magnitudes e ângulos

das tensões complexas, onde  $n=2N_b-1$ ; e  $R_m$  é a matriz de covariância dos erros de medição.

O problema em (1) pode ser resolvido iterativamente pela equação (2) [20] [21].

$$G\Delta\hat{x} = H^T R^{-1} (z_m - h(\hat{x})) \quad (2)$$

onde  $G$  é a matriz ganho e  $H$  é a matriz Jacobiana, definidas pelas expressões (3) e (4).

$$G = H^T R^{-1} H \quad (3)$$

$$H = \frac{\partial h(x)}{\partial x} \quad (4)$$

## 2.2 Formulação desacoplada tradicional

Conforme demonstrado em [19], a carga computacional associada à solução de (2) pode ser reduzida por meio da exploração do desacoplamento P $\theta$ -QV, observado normalmente em sistemas de transmissão. O sucesso da EE desacoplada é reforçado pelo fato de que os elementos na matriz ganho não mudam significativamente durante o processo iterativo [20].

Na formulação desacoplada, o problema em (1) e as matrizes e vetores relacionados são divididos em duas partes: ativas e reativa, levando à partição do vetor de medição expressa em (4).

$$z_m = \begin{bmatrix} z_m^P \\ z_m^Q \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{onde: } z_m^P = \begin{bmatrix} P_{flow} \\ P_{inj} \end{bmatrix} \text{ and } z_m^Q = \begin{bmatrix} Q_{flow} \\ Q_{inj} \\ V_{mag} \end{bmatrix}$$

e

$p_{flow}$  e  $q_{flow}$  são vetores de medidas de fluxo de potência ativa e reativa, respectivamente;  $p_{inj}$  e  $q_{inj}$  são vetores de medidas de injeção de potência ativa e reativa, respectivamente;  $V$  é o vetor de medidas de magnitude das tensões.

A matriz de covariância deve seguir a mesma partição, sendo expressa por (5).

$$R = \begin{bmatrix} R_m^P & 0 \\ 0 & R_m^Q \end{bmatrix} \quad (5)$$

Da mesma forma, a matriz Jacobiana é definida pela equação (6).

$$H(V, \theta) = \begin{bmatrix} H_{P\theta} & H_{PV} \\ H_{Q\theta} & H_{QV} \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde:

$$H_{P\theta} = \frac{\partial h_p(x)}{\partial \theta}, \quad H_{PV} = \frac{\partial h_p(x)}{\partial V} \quad (7)$$

$$H_{Q\theta} = \frac{\partial h_q(x)}{\partial \theta}, \quad H_{QV} = \frac{\partial h_q(x)}{\partial V} \quad (8)$$

sendo  $h_p(\cdot)$  e  $h_q(\cdot)$  as funções que relacionam as medidas ativas e reativas, respectivamente, com os estados.

De (3) e (4) é possível definir a partição correspondente da matriz ganho, como expresso em (9).

$$G = \begin{bmatrix} G_{P\theta} & G_{PV} \\ G_{Q\theta} & G_{QV} \end{bmatrix} \quad (9)$$

onde:

$$G_{P\theta} = H_{P\theta}^T R_P^{-1} H_{P\theta} + H_{Q\theta}^T R_Q^{-1} H_{Q\theta} \quad (10)$$

$$G_{PV} = H_{P\theta}^T R_P^{-1} H_{PV} + H_{Q\theta}^T R_Q^{-1} H_{QV} \quad (11)$$

$$G_{Q\theta} = H_{PV}^T R_P^{-1} H_{P\theta} + H_{QV}^T R_Q^{-1} H_{Q\theta} \quad (12)$$

$$G_{QV} = H_{PV}^T R_P^{-1} H_{PV} + H_{QV}^T R_Q^{-1} H_{QV} \quad (13)$$

Conforme discutido em [18] [19] [20], as simplificações relevantes associadas às técnicas desacopladas podem ser aplicadas para ignorar os blocos de matrizes fora da diagonal principal da matriz Jacobiana em (6) ou da matriz ganho em (9), levando a dois modelos diferentes de estimador de estado desacoplado: desacoplado no modelo ou desacoplado no algoritmo.

As versões desacopladas da EE foram propostas e avaliadas na literatura considerando o modelo barra-ramo da rede elétrica. A seção seguinte apresenta o estimador de estados proposto neste trabalho em que a EE desacoplada é ampliada eficientemente para acomodar o modelo de seção de barra, onde os ramos chaveáveis são explicitamente representados. Ambos os modelos acima mencionados são considerados e avaliados, conforme discutido a seguir.

## 3 Estimação de Estados Generalizada Desacoplada

Como mencionado anteriormente, a EEG permite uma representação mais detalhada da rede. Nesta formulação, os arranjos da subestação e suas medições internas podem ser processados pelo estimador e ser usados para melhorar uma de suas principais funcionalidades, o processamento de erros. No entanto, o tempo computacional é afetado devido ao aumento do tamanho do problema.

Esta seção propõe uma nova formulação para a EEG, que explora eficientemente as técnicas desacopladas discutidas na seção anterior. A proposta de Estimação de Estados Generalizada Desacoplada Rápida (EEG-DR), pode reduzir significativamente o alto tempo computacional imposto pelo nível da seção de barra adotado na abordagem generalizada.

Como na EEG, a EEG-DR está centrada na extensão do vetor de estado para incluir o fluxo de potência através dos ramos chaveáveis como novas variáveis de estado, juntamente



com a fase e a magnitude das tensões nodais. Na abordagem proposta, no entanto, o vetor estendido é dividido de acordo com a natureza ativa e reativa das variáveis de estado convencional e das novas variáveis, conforme a equação (14).

$$\bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{x}}^P \\ \bar{\mathbf{x}}^Q \end{bmatrix}, \text{ sendo: } \bar{\mathbf{x}}^P = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ \mathbf{t} \end{bmatrix} \text{ e } \bar{\mathbf{x}}^Q = \begin{bmatrix} \mathbf{V} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} \quad (14)$$

onde:  $\boldsymbol{\theta}$  e  $\mathbf{V}$  são os vetores de fase e magnitude das tensões de barra/seção de barra, respectivamente; e  $\mathbf{t}$  e  $\mathbf{u}$  são os vetores de fluxo de potência ativa e reativa através dos ramos chaveáveis, respectivamente.

Além disso, as informações relacionadas ao status de cada ramo chaveável modelado são incluídas como pseudo-medidas na formulação do problema. Se um ramo chaveável conectado entre os nós  $i$  e  $j$  estiver fechado, a diferença angular ( $\theta_{ij}$ ) e a queda de tensão ( $V_{ij}$ ) são zero. Por outro lado, se o dispositivo estiver aberto, o fluxo de potência ativa ( $t_{ij}$ ) e reativa ( $u_{ij}$ ) é que serão nulos. Essas informações são referenciadas por equações operacionais, uma vez que dependem do status do dispositivo.

Enquanto o nível da seção de barra estende o vetor de medição para incluir medidas convencionais e as equações operacionais acima, a abordagem desacoplada proposta particiona esses conjuntos de informações de acordo com sua natureza ativa ou reativa. Isso implica em um vetor de medição estendido particionado, dado por:

$$\bar{\mathbf{z}} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{z}}^P \\ \bar{\mathbf{z}}^Q \end{bmatrix} \quad (15)$$

onde:

$$\bar{\mathbf{z}}^P = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{z}}_m^P \\ \bar{\mathbf{z}}_o^P \end{bmatrix} \text{ e } \bar{\mathbf{z}}^Q = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{z}}_m^Q \\ \bar{\mathbf{z}}_o^Q \end{bmatrix} \quad (16)$$

Os subíndices  $P$  e  $Q$  designam novamente o conjunto de informações ativas e reativas, respectivamente,  $m$  faz referência a medidas convencionais e  $o$  às equações operacionais (equações de *status* do dispositivo). Assim,  $\bar{\mathbf{z}}_m^P$  ( $\bar{\mathbf{z}}_m^Q$ ) é o vetor estendido das medidas ativas (reativas),  $\bar{\mathbf{z}}_o^P$  ( $\bar{\mathbf{z}}_o^Q$ ) é o vetor das pseudomedidas operacionais ativas (reativas) – diferença de ângulo nulo de dispositivos fechados e fluxo de potência ativa (reativa) nulo de dispositivos abertos.

Os vetores desacoplados de medidas e das equações operacionais podem ser expressos por (17) e (18).

$$\bar{\mathbf{z}}_m^P = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{flow} \\ \mathbf{p}_{inj} \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{z}}_m^Q = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{flow} \\ \mathbf{q}_{inj} \\ \mathbf{V}_{mag} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\bar{\mathbf{z}}_o^P = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}_{ij} \\ \mathbf{t}_{ij} \end{bmatrix} \text{ e } \bar{\mathbf{z}}_o^Q = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{ij} \\ \mathbf{u}_{ij} \end{bmatrix} \quad (18)$$

onde:

$\theta_{ij}$ : vetor das diferenças angulares nulas associado aos dispositivos fechados;

$V_{ij}$ : vetor das diferenças de tensão nulas associado aos dispositivos abertos;

$t_{ij}$ : vetor dos fluxos de potência ativa nulos, associado aos dispositivos abertos;

$u_{ij}$ : vetor dos fluxos de potência reativa nulos, associado aos dispositivos abertos.

É importante lembrar que a representação da rede no nível da seção de barras requer uma revisão das equações de injeção de potência, que ditará a relação entre as medidas de injeção de potência e os estados. A equação de injeção de potência em uma barra  $k$  é igual à soma dos fluxos de potência através dos ramos incidentes. Enquanto o fluxo de potência através dos ramos convencionais (linhas de transmissão e transformadores) é expresso em termos de seus parâmetros e tensões complexas, a potência que flui através de ramos chaveáveis deve ser expressa diretamente em termos das novas variáveis de estado. Portanto, as funções não lineares que relacionam as medidas de injeção de potência ativa e reativa aos estados podem ser expressas por (19) [2].

$$\begin{aligned} P_i &= \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij}(V_i, V_j, \theta_i, \theta_j) + \sum_{l \in \Gamma_i} t_{il} \\ Q_i &= -Q_i^{sh}(V_i) + \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij}(V_i, V_j, \theta_i, \theta_j) + \sum_{l \in \Gamma_i} u_{il} \end{aligned} \quad (19)$$

onde:

$\Omega_i$ : conjunto das barras conectadas à barra  $i$  através de ramos convencionais;

$\Gamma_i$ : conjunto das barras conectadas à barra  $i$  através de ramos chaveáveis.

Na abordagem proposta, a matriz Jacobiana estendida é expressa pela equação (20), levando em consideração toda a formulação e partição proposta.

$$\bar{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{H}}_{P0} & \bar{\mathbf{H}}_{Pv} \\ \bar{\mathbf{H}}_{Q0} & \bar{\mathbf{H}}_{Qv} \end{bmatrix} \quad (20)$$

onde:

$$\bar{\mathbf{H}}_{P0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{p}_{flow}}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial \mathbf{p}_{flow}}{\partial \mathbf{t}_{ij}} \\ \frac{\partial \mathbf{p}_{inj}}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial \mathbf{p}_{inj}}{\partial \mathbf{t}_{ij}} \\ \frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \mathbf{t}_{ij}} \\ \frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \mathbf{t}_{ij}} \\ \frac{\partial t_{ij}}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial t_{ij}}{\partial \mathbf{t}_{ij}} \\ \frac{\partial \theta}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial \theta}{\partial \mathbf{t}_{ij}} \end{bmatrix}; \quad \bar{\mathbf{H}}_{Pv} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{p}_{flow}}{\partial \mathbf{V}_{mag}} & \frac{\partial \mathbf{p}_{flow}}{\partial \mathbf{u}_{ij}} \\ \frac{\partial \mathbf{p}_{inj}}{\partial \mathbf{V}} & \frac{\partial \mathbf{p}_{inj}}{\partial \mathbf{u}_{ij}} \\ \frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \mathbf{V}} & \frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \mathbf{u}_{ij}} \\ \frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \mathbf{V}} & \frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \mathbf{u}_{ij}} \\ \frac{\partial t_{ij}}{\partial \mathbf{V}} & \frac{\partial t_{ij}}{\partial \mathbf{u}_{ij}} \\ \frac{\partial \theta}{\partial \mathbf{V}} & \frac{\partial \theta}{\partial \mathbf{u}_{ij}} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\bar{\mathbf{H}}_{Q0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{q}_{\text{flow}}}{\partial \theta} & \frac{\partial \mathbf{q}_{\text{flow}}}{\partial \mathbf{t}_{ij}} \\ \frac{\partial \mathbf{q}_{\text{inj}}}{\partial \theta} & \frac{\partial \mathbf{q}_{\text{inj}}}{\partial \mathbf{t}_{ij}} \\ \frac{\partial \mathbf{V}_{\text{mag}}}{\partial \theta} & \frac{\partial \mathbf{V}_{\text{mag}}}{\partial \mathbf{t}_{ij}} \\ \frac{\partial \mathbf{V}_{ij}}{\partial \theta} & \frac{\partial \mathbf{V}_{ij}}{\partial \mathbf{t}_{ij}} \\ \frac{\partial \mathbf{u}_{ij}}{\partial \theta} & \frac{\partial \mathbf{u}_{ij}}{\partial \mathbf{t}_{ij}} \end{bmatrix}; \quad \bar{\mathbf{H}}_{QV} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{q}_{\text{flow}}}{\partial \mathbf{V}} & \frac{\partial \mathbf{q}_{\text{flow}}}{\partial \mathbf{u}_{ij}} \\ \frac{\partial \mathbf{q}_{\text{inj}}}{\partial \mathbf{V}} & \frac{\partial \mathbf{q}_{\text{inj}}}{\partial \mathbf{u}_{ij}} \\ \frac{\partial \mathbf{V}_{\text{mag}}}{\partial \mathbf{V}} & \frac{\partial \mathbf{V}_{\text{mag}}}{\partial \mathbf{u}_{ij}} \\ \frac{\partial \mathbf{V}_{ij}}{\partial \mathbf{V}} & \frac{\partial \mathbf{V}_{ij}}{\partial \mathbf{u}_{ij}} \\ \frac{\partial \mathbf{u}_{ij}}{\partial \mathbf{V}} & \frac{\partial \mathbf{u}_{ij}}{\partial \mathbf{u}_{ij}} \end{bmatrix}$$

É importante enfatizar que as expressões que representam as equações operacionais associadas aos ramos chaveáveis são sempre lineares. Isso significa que as submatrizes correspondentes a essas informações em (21) são meramente compostas por "0" e "1". Além disso, as matrizes Jacobianas resultarão claramente em várias submatrizes nulas, conforme expresso pelas equações (22) e (23).

$$\bar{\mathbf{H}}_{P0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{p}_{\text{flow}}}{\partial \theta} & \mathbf{0} \\ \frac{\partial \mathbf{p}_{\text{inj}}}{\partial \theta} & \begin{cases} \mathbf{0} \\ \pm 1 \end{cases} \\ \begin{cases} \mathbf{0} \\ \pm 1 \end{cases} & \begin{cases} \mathbf{0} \\ \pm 1 \end{cases} \\ \mathbf{0} & \begin{cases} \mathbf{0} \\ \pm 1 \end{cases} \end{bmatrix}; \quad \bar{\mathbf{H}}_{PV} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{p}_{\text{flow}}}{\partial \mathbf{V}} & \mathbf{0} \\ \frac{\partial \mathbf{p}_{\text{inj}}}{\partial \mathbf{V}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\bar{\mathbf{H}}_{Q0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{q}_{\text{flow}}}{\partial \theta} & \mathbf{0} \\ \frac{\partial \mathbf{q}_{\text{inj}}}{\partial \theta} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}; \quad \bar{\mathbf{H}}_{QV} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{q}_{\text{flow}}}{\partial \mathbf{V}} & \mathbf{0} \\ \frac{\partial \mathbf{q}_{\text{inj}}}{\partial \mathbf{V}} & \begin{cases} \mathbf{0} \\ \pm 1 \end{cases} \\ \frac{\partial \mathbf{V}_{\text{mag}}}{\partial \mathbf{V}} & \mathbf{0} \\ \begin{cases} \mathbf{0} \\ \pm 1 \end{cases} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \begin{cases} \mathbf{0} \\ \pm 1 \end{cases} \end{bmatrix} \quad (23)$$

Comparando (7-8) e (22-23), pode-se concluir facilmente que as submatrizes de  $\mathbf{H}_{PV}$  e  $\mathbf{H}_{Q0}$  são acrescidas apenas por elementos nulos quando a modelagem de seção de barras é assumida na representação da rede elétrica.

Já a matriz ganho estendida pode ser obtida pelas equações (10) a (13) substituindo-se a matriz jacobiana convencional pela sua versão estendida correspondente, definida em (20-21), isto é:

$$\bar{\mathbf{G}} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{G}}_{P0} & \bar{\mathbf{G}}_{PV} \\ \bar{\mathbf{G}}_{Q0} & \bar{\mathbf{G}}_{QV} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Assim, se a condição básica para o desacoplamento P0-QV se aplica e considerando a estrutura da matriz jacobiana estendida, representada em (22-23), as submatrizes fora da diagonal da matriz ganho estendida são muito menos significativas do que as da diagonal principal.

Dessa forma conclui-se que a inclusão do novo conjunto de variáveis de estado e equações operacionais não deteriora as características de desacoplamento da matriz Jacobiana e,

consequentemente, não deteriora as características de desacoplamento da matriz Ganho. Além disso, confirma-se que a modelagem no nível de seção de barras reforça a natureza de desacoplamento de ambas as matrizes.

Apoiado nas conclusões acima, este artigo propõe a extensão dos dois modelos clássicos de desacoplamento do estimador de estado, o desacoplamento no modelo, originalmente proposto em [18] e [19], e o desacoplamento no algoritmo, originalmente proposto em [22] e [23], de forma a torná-los capazes de processar redes modeladas no nível da seção de barras.

### 3.1 EEG Desacoplado no Modelo: EEG-DM

Esta seção apresenta a versão estendida do EEG-DR desacoplado no modelo. Nesse modelo as submatrizes fora da diagonal principal da matriz Jacobiana estendida ( $\bar{\mathbf{H}}_{PV}$  e  $\bar{\mathbf{H}}_{Q0}$ ) são desprezadas, resultando na versão simplificada da matriz Jacobiana estendida ( $\tilde{\mathbf{H}}$ ), expressa na equação (25).

$$\tilde{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{H}}_{P0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \bar{\mathbf{H}}_{QV} \end{bmatrix} \quad (25)$$

A simplificação proposta afeta tanto a matriz ganho quanto o vetor do lado direito no processo de solução representado em (2), conforme equações (26) a (29).

$$\tilde{\mathbf{G}}_{P0}^{md} = \bar{\mathbf{H}}_{P0}^T \mathbf{R}_m^{Q-1} \bar{\mathbf{H}}_{P0} \quad (26)$$

$$\tilde{\mathbf{G}}_{QV}^{md} = \bar{\mathbf{H}}_{QV}^T \mathbf{R}_m^{Q-1} \bar{\mathbf{H}}_{QV} \quad (27)$$

$$\tilde{\mathbf{T}}_P^{md} = \bar{\mathbf{H}}_{P0}^T \mathbf{R}_P^{-1} [\bar{\mathbf{z}}_m^P - \bar{\mathbf{h}}_m^P] \quad (28)$$

$$\tilde{\mathbf{T}}_Q^{md} = \bar{\mathbf{H}}_{QV}^T \mathbf{R}_Q^{-1} [\bar{\mathbf{z}}_m^Q - \bar{\mathbf{h}}_m^Q] \quad (29)$$

Nessas condições, o problema estendido pode ser resolvido iterativamente por meio de dois sistemas lineares independentes, como indicado nas equações (30) a (33).

$$\tilde{\mathbf{G}}_{P0}^{md} \Delta \hat{\mathbf{x}}_P = \tilde{\mathbf{T}}_P^{md} (\theta^k, V^k) \quad (30)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_P^{k+1} = \hat{\mathbf{x}}_P^k + \Delta \hat{\mathbf{x}}_P^k \quad (31)$$

$$\tilde{\mathbf{G}}_{QV}^{md} \Delta \hat{\mathbf{x}}_Q = \tilde{\mathbf{T}}_Q^{md} (\theta^{k+1}, V^k) \quad (32)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_Q^{k+1} = \hat{\mathbf{x}}_Q^k + \Delta \hat{\mathbf{x}}_Q^k \quad (33)$$

onde:

$$\mathbf{R}_P = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_P^m & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_P^c \end{bmatrix}; \quad \mathbf{R}_Q = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_Q^m & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_Q^c \end{bmatrix};$$

$$\Delta \hat{\mathbf{x}}_P = \begin{bmatrix} \Delta \hat{\theta} \\ \Delta \hat{\mathbf{t}}_{ij} \end{bmatrix}; \quad \Delta \hat{\mathbf{x}}_Q = \begin{bmatrix} \Delta \hat{V} \\ \Delta \hat{\mathbf{u}}_{ij} \end{bmatrix}$$

Assim como na versão barra-ramo do estimador desacoplado, as seguintes afirmações continuam válidas quando a abordagem estendida proposta neste trabalho é aplicada:

- embora as aproximações sejam aplicadas em ambos os lados da equação, o que significa que o resultado não é exato, a diferença é aceitável para fins de operação em tempo real, desde que o efeito de desacoplamento seja observado (relações X/R altas);

- as matrizes ganho e jacobiana são mantidas constantes durante o processo iterativo;
- ambas as versões BX e XB podem ser aplicadas.

### 3.2 EEG Desacoplado no Algoritmo: EEG-DA

Neste modelo, as aproximações são realizadas diretamente na matriz ganho, mantendo a matriz Jacobiana e, conseqüentemente, o vetor do lado direito inalterados. Isso significa que o resultado obtido é exato, pois apenas o processo iterativo é afetado.

Assim, este modelo despreza as submatrizes fora da diagonal da matriz ganho,  $G_{PV}$  e  $G_{Q\theta}$ , e mantém o cálculo das submatrizes principais sem aproximações, mas mantendo sua extensão para modelagem no nível de seção de barras, conforme equações (34) a (37).

$$\bar{G}_{P\theta}^{ad} = \bar{H}_{P\theta}^T R_m^{P-1} \bar{H}_{P\theta} + \bar{H}_{Q\theta}^T R_m^{Q-1} \bar{H}_{Q\theta} \quad (34)$$

$$\bar{G}_{QV}^{ad} = \bar{H}_{PV}^T R_m^{P-1} \bar{H}_{PV} + \bar{H}_{QV}^T R_m^{Q-1} \bar{H}_{QV} \quad (35)$$

$$\bar{T}_P^{ad} = \begin{bmatrix} \bar{H}_{P\theta}^T \\ \bar{H}_{Q\theta}^T \end{bmatrix}^T R^{-1} [\bar{z}_m^P - \bar{h}_m^P] \quad (36)$$

$$\bar{T}_Q^{ad} = \begin{bmatrix} \bar{H}_{PV}^T \\ \bar{H}_{QV}^T \end{bmatrix}^T R^{-1} [\bar{z}_m^Q - \bar{h}_m^Q] \quad (37)$$

O processo iterativo representado por (30-32) pode ser aplicado igualmente à versão da EEG-DR desacoplada no algoritmo, substituindo adequadamente a matriz ganho e o vetor do lado direito, conforme equações (38) a (41).

$$\bar{G}_{P\theta}^{ad} \Delta \hat{x}_P = \bar{T}_P^{ad} (\theta^k, V^k) \quad (38)$$

$$\hat{x}_P^{k+1} = \hat{x}_P^k + \Delta \hat{x}_P^k \quad (39)$$

$$\bar{G}_{QV}^{ad} \Delta \hat{x}_Q = \bar{T}_Q^{ad} (\theta^{k+1}, V^k) \quad (40)$$

$$\hat{x}_Q^{k+1} = \hat{x}_Q^k + \Delta \hat{x}_Q^k \quad (41)$$

## 4 Simulações e Resultados

Para avaliar o desempenho da abordagem proposta, três rotinas computacionais foram implementadas usando o Matlab®: a) um EEG completo, onde nenhuma técnica de desacoplamento é aplicada; b) a versão do EEG desacoplado no modelo, referida como EEG-DM, onde as técnicas de desacoplamento descritas na Seção 3.1 são totalmente exploradas; e c) a versão do EEG desacoplada no algoritmo, EEG-DA, descrita na Seção 3.2. Dois sistemas teste são usados: sistema teste IEEE 14 barras e sistema real envolvendo o sistema elétrico que atende a região de Curitiba, com destaque para a subestação (SE) de Umbará, conforme descrito a seguir.

### 4.1 Sistema IEEE 14 barras com subestações detalhadas: 65 nós, 73 disjuntores

Nesta seção, o sistema de teste de 14 barras do IEEE detalhado no nível de seção de barras em [15] é usado para ilustrar a eficiência e o desempenho do EEG Desacoplado. O diagrama unifilar desse sistema está reproduzido na Figura

1. Diferentemente de muitos trabalhos apresentados na literatura envolvendo EEG, onde apenas um conjunto bem restrito de subestações suspeitas é representado no nível da seção de barras, os resultados das simulações neste trabalho avaliam várias combinações, incluindo o caso extremo em que todas as SEs do sistema de 14 barras são representadas nesse nível de detalhe. São apresentadas e discutidas comparações sobre a eficiência e o desempenho das versões completa da EEG e das versões desacopladas EEG-DM e EEG-DA.

#### 4.1.1 Sistema completo modelado no nível de seção de barras

Os resultados nesta seção correspondem a simulações em que todo o sistema de 14 barras é modelado no nível da seção de barras, exatamente como ilustrado na Figura 1. Os resultados permitem comparar o desempenho do EEG completo com as versões desacopladas EEG-DM e EEG-DA. Assume-se que o sistema teste de 14 barras (Fig.1) contém medidas de fluxo de potência ativas e reativas em todos os ramos, injeções de energia ativa e reativa, bem como a magnitude de tensão em todos as barras. Desta forma, a redundância é assegurada e a importância do desempenho computacional é enfatizada, uma vez que um alto número de medidas deve ser processado.

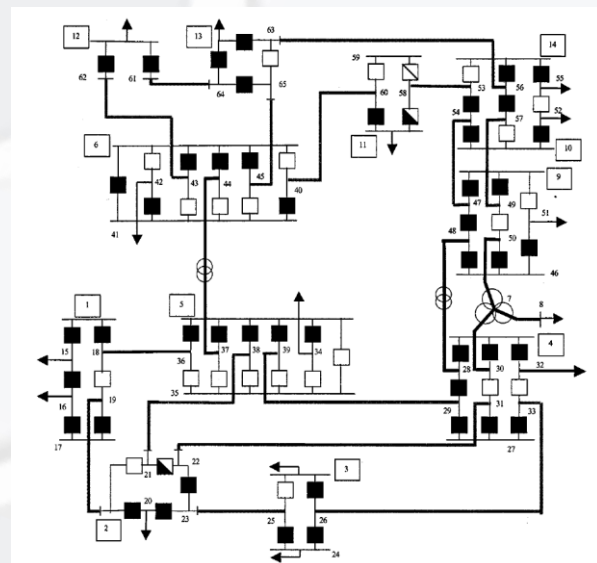


Figura 1: Sistema teste IEEE 14 barras no nível de seção de barras: 65 nós, 73 disjuntores.

Para avaliar o impacto das aproximações impostas pela formulação desacoplada quando comparada à abordagem completa (onde nenhuma aproximação é feita), foi calculado o erro absoluto entre o valor estimado com EEG completo e o valor estimado com uma das versões desacopladas, conforme equação (42):

$$\mathcal{E}_k = \left| \hat{x}_k^{EEG\_completo} - \hat{x}_k^{EEG\_desacoplado} \right| \quad (42)$$

Por restrição de espaço, apenas os resultados associados aos maiores erros são mostrados na Tabela 1, que contém a magnitude e o ângulo de tensão de barra obtidos por cada método e o erro correspondente.

Pode-se verificar que o maior erro absoluto do EEG-DM é de  $3 \times 10^{-4}$  para a magnitude da tensão e  $3,6 \times 10^{-4}$  para o ângulo de tensão, ambos na barra 61. O EEG completo atingiu a solução em quatro iterações e o EEG-DM em onze iterações ativas e dez iterações reativas. Para o EEG-DA, o maior erro absoluto verificado foi de  $2 \times 10^{-4}$  para a magnitude da tensão e  $5,41 \times 10^{-5}$  para o ângulo, ambos na barra 20. O EEG-DA atingiu a solução em seis iterações ativas e seis iterações reativas.

O erro absoluto médio (MAE) e o desvio padrão (SD) definidos pelas equações (43) e (44) também foram calculados.

$$MAE = \frac{1}{N_b} \sum_{k=1}^{N_b} \left| \hat{x}_k^{EEG\_completo} - \hat{x}_k^{EEG\_Desacoplado} \right| \quad (43)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N_b} \left| \hat{x}_k^{EEG\_completo} - \hat{x}_k^{EEG\_desacoplado} - MAE \right|^2}{N_b - 1}} \quad (44)$$

Neste caso, para EEG-DM o MAE para a magnitude da tensão e para o ângulo de tensão são de  $1,38 \times 10^{-5}$  e  $3,54 \times 10^{-5}$ , respectivamente, resultando em um SD de  $4,96 \times 10^{-5}$  e  $6,52 \times 10^{-5}$ , respectivamente. Para o EEG-DA, o MAE para a magnitude e o ângulo são  $2 \times 10^{-5}$  e  $2,79 \times 10^{-5}$ , respectivamente, correspondendo a um SD de  $7,75 \times 10^{-5}$  e  $1,10 \times 10^{-5}$ , respectivamente.

Esses resultados estão em linha com as expectativas de que o bom desempenho de métodos de estimação de estado desacoplados, amplamente avaliado na literatura para modelagem barra-ramo, continua a ser verificado para a formulação no nível de seção de barras proposta nesse trabalho.

Tabela 1: Valores estimados e erro absoluto.

Barra	EEG-completo		EEG-DM		EEG-DA	
	V	$\Theta$	$\epsilon(V)$	$\epsilon(\Theta)$	$\epsilon(V)$	$\epsilon(\Theta)$
1	1,060	0	0	0	0	0
9	1,027	-15,069	$1,00 \times 10^{-20}$	$4,19 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-20}$	$2,79 \times 10^{-5}$
12	1,053	-15,718	$1,00 \times 10^{-4}$	$2,72 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-20}$	$2,62 \times 10^{-5}$
13	1,046	-15,737	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,40 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-20}$	$2,62 \times 10^{-5}$
14	1,0174	-16,393	$1,00 \times 10^{-20}$	$8,20 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-20}$	$2,79 \times 10^{-5}$
20	1,045	-4,955	$1,00 \times 10^{-20}$	$1,75 \times 10^{-6}$	$2,00 \times 10^{-4}$	$5,41 \times 10^{-5}$
28	1,026	-10,364	$1,00 \times 10^{-20}$	$1,22 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-20}$	$2,97 \times 10^{-5}$
36	1,032	-8,945	$1,00 \times 10^{-20}$	$1,00 \times 10^{-20}$	$1,00 \times 10^{-20}$	$1,05 \times 10^{-5}$
43	1,070	-14,978	$1,00 \times 10^{-20}$	$1,05 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-20}$	$2,62 \times 10^{-5}$
49	1,027	-15,069	$1,00 \times 10^{-20}$	$5,76 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-20}$	$2,97 \times 10^{-5}$
55	1,017	-16,393	$1,00 \times 10^{-20}$	$8,20 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-20}$	$2,79 \times 10^{-5}$
61	1,053	-15,718	$3,00 \times 10^{-4}$	$3,60 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-20}$	$2,62 \times 10^{-5}$
63	1,046	-15,737	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,22 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-20}$	$2,79 \times 10^{-5}$

#### 4.1.2 Tempo computacional

Esta seção ilustra o desempenho do EEG-DM e EEG-DA em relação ao número de subestações representadas detalhadamente. Observou-se o número de iterações ( $n_{iter}$ ) e o tempo computacional ( $t$ ) de dois casos extremos do sistema de teste de 14 barras, quais sejam:

Caso 1: apenas uma das 14 barras é representada em detalhes (barra 1);

Caso 2: todas as 14 barras estão representadas no nível de seção de barras, exatamente como representado na Figura 1.

Os resultados, resumidos na Tabela 2, contêm ainda o tempo computacional exigido pelo EEG completo para processar os Casos 1 e 2.

O tempo computacional exigido pelas versões desacopladas é claramente inferior ao tempo requerido pelo EEG completo, como esperado. Pode-se também verificar que a modelagem de todo o sistema no nível da seção de barras acarreta um aumento no tempo computacional de 79% quando o EEG completo é utilizado. Em contraste, um aumento de 51% é percebido quando o EEG-DM é considerado e de 68% para o EEG-DA, tornando-os claramente mais eficientes do que EEG completo.

Tabela 2: Comparação do tempo computacional.

Caso	EEG		EEG-DM		EEG-DA			
	$n_{iter}$	$t$ (ms)	$n_{iter\_P}$	$n_{iter\_Q}$	$t$ (ms)	$n_{iter\_P}$	$n_{iter\_Q}$	$t$ (ms)
1	3	$T_1+28$	6	5	$T_1$	5	4	$T_1+19$
2	4	$T_1+485$	11	10	$T_1+274$	6	6	$T_1+397$

\*  $T_1=534$  ms

A superioridade das versões desacopladas do EEG é melhor ilustrada na Figura 2, onde os resultados de uma sequência de simulações são apresentados. A primeira simulação considera que apenas uma das 14 barras do sistema é modelada no nível de seção de barras, a segunda considera que duas barras são modeladas nesse nível de detalhe, e assim por diante, até que na última simulação todas as barras são representadas detalhadamente ( $n_{sd}$ ). A Figura 2 ilustra essa sequência de simulações. Verifica-se que a superioridade das versões desacopladas em reduzir o tempo computacional ( $t_{comp}$ ) é acentuada à medida que aumenta o número de subestações representadas em detalhes.



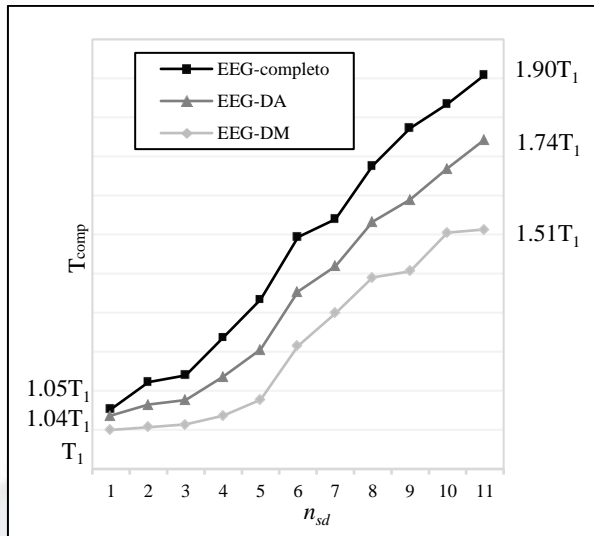


Figura 2: Comparação do tempo computacional com variação do número de subestações detalhadas.

#### 4.2 Sistema Teste Real

Nesta seção, o sistema elétrico de 69-230kV da Copel que atende a região de Curitiba é usado para ilustrar o desempenho do estimador de estados generalizado em aplicações com sistemas reais. O diagrama unifilar desse sistema é ilustrado na Figura 3.

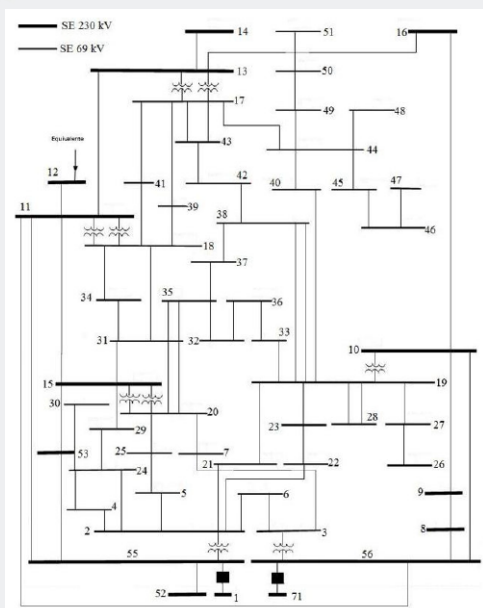


Figura 3: Sistema teste real – Modelo barra-ramo.

A Subestação (SE) Umbará, representada na Figura 3 pelas barras 55 e 56, foi escolhida para ser representada no nível de seção de barras, permitindo seus elementos chaveáveis sejam explicitamente representados. A Figura 4 mostra as conexões entre a SE Umbará (barras 55 e 56), com as demais barras do sistema, considerando ainda a modelagem barra-ramo da rede. Já a modelagem no nível de seção de barras dessa subestação está reproduzida na Figura 5.

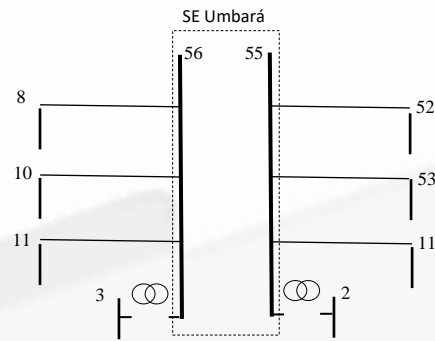


Figura 4: Barramentos da SE Umbará e conexões.

Assume-se que o sistema teste da região de Curitiba contém medidas de fluxo de potência ativas e reativas em todos os ramos, injeções de potência ativa e reativa, bem como a magnitude de tensão em todas as barras. Dessa forma, a redundância é assegurada e a importância do desempenho computacional é enfatizada, uma vez que um alto número de medidas deve ser processado.

Os resultados nesta seção correspondem a simulações em que a subestação Umbará é modelada no nível da seção de barra, exatamente como ilustrado na Figura 5.

Para ilustrar os resultados obtidos, a Tabela 3 apresenta os valores estimados das tensões nos barramentos correspondentes a SE Umbará e nos barramentos vizinhos, conforme ilustrado na Figura 4.

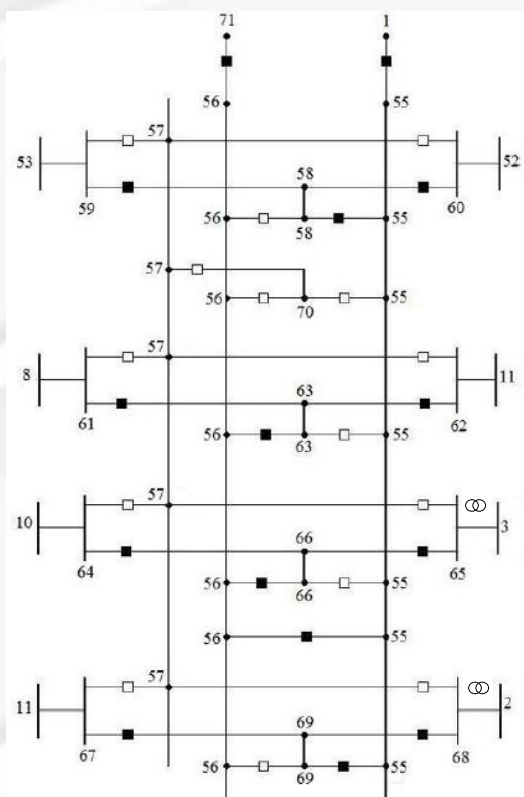


Figura 5: Configuração da SE Umbará.



Tabela 3: Tensões estimadas: SE Umbará e barras vizinhas.

Barra	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	Barra	Tensão (pu)	Ângulo (graus)
56	1,012	0,000	55	1,012	0,000
8	0,9980	-0,7195	52	0,9940	-0,7340
10	0,9836	-1,5731	53	0,9966	-0,2095
11	0,9965	0,1518	11	0,9965	0,1518
3	0,9597	-5,6688	2	0,9566	-5,8175

Na Tabela 4 são apresentadas algumas das estimativas obtidas para os fluxos de potência através dos disjuntores fechados modelados na SE. As estimativas obtidas para os fluxos através de disjuntores abertos são muito próximas de zero, na ordem de  $10^{-20}$ , comprovando a efetividade da ferramenta proposta.

Tabela 4: Estimativa para o fluxo de potência nos ramos chaveáveis.

Ramo	Fluxo de Potência (pu)
55 - 56	185, 563 + j86, 272
Barra 55	
1 - 55	360, 367 + j172, 136
58 - 59	36, 382 + j22, 275
55 - 58	130, 613 + j47, 816
58 - 60	94, 231 + j25, 541
67 - 69	7, 219 - j12, 416
68 - 69	-51, 410 - j25, 631
Barra 56	
63 - 61	66, 175 - j4, 225
62 - 63	18, 697 - j37, 536
56 - 63	47, 478 + j33, 311
64 - 66	-86, 454 - j28, 436
65 - 66	-51, 631 - j24, 525
56 - 66	138, 085 + j52, 961

Os resultados obtidos estão em linha com as expectativas de que o bom desempenho de métodos de estimação de estado desacoplados, amplamente avaliado na literatura para modelagem barra-ramo, continua a ser verificado para a formulação ampliada proposta neste trabalho, onde o modelo de seção de barras é considerado.

## 5 Conclusão

Este artigo apresenta uma formulação desacoplada para a estimação de estado generalizada, onde os ramos chaveáveis são explicitamente representados, resultando em um conjunto expandido de variáveis de estado e equações operacionais que levam em conta o particionamento ativo e reativo dos métodos desacoplados.

A estimação de estados generalizada desacoplada resultante explora o alto desempenho das técnicas de desacoplamento P $\theta$ -QV, até então restrita ao nível barra-ramo. Assim, a nova abordagem é capaz de lidar com a desvantagem da EEG, qual seja, o aumento da dimensão do problema imposto pela modelagem no nível de seção de barras.

O artigo demonstra que a extensão proposta reforça a natureza desacoplada da estimação de estado, não deteriorando sua característica de esparsidade e não

exigindo qualquer simplificação adicional quando da sua extensão para a modelagem no nível de seção de barras. As versões de desacoplamento no modelo e no algoritmo, disponíveis na literatura para a modelagem barra-ramo, são aplicadas à formulação generalizada, gerando dois algoritmos distintos. O mesmo desempenho e precisão de convergência encontrados nos estimadores convencionais desacoplados são obtidos com as versões generalizadas propostas. Os EEGs desacoplados no modelo e no algoritmo podem ser explorados para representar uma área mais significativa da rede no nível de subestação, melhorando a eficiência do processamento de erros com um tempo computacional bem inferior ao obtido com o EEG convencional. Assim, a formulação proposta torna a abordagem generalizada mais viável para aplicações em tempo real.

## Referências

- [1] SCHWEPPE, F. C., WILDES, J. and ROM, D. B. Power System Static-State Estimation. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 89, n. 1, 1970.
- [2] MONTICELLI, A. and GARCIA, A. V. Modeling Zero Impedance Branches in Power Systems State Estimation. **IEEE PES Winter Meeting**, v. 8, n. 1, Jan, 1991.
- [3] MONTICELLI, A. The Impact of Modeling Short Circuits Branches in State Estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.8, n.1, Feb, 1993.
- [4] MONTICELLI, A. Modeling Circuit Breakers in Weighted Least Squares State Estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.8, n.3, Aug, 1993.
- [5] ALSAÇ, O., VEMPATI, N., STOTT, B. and MONTICELLI, A. Generalized State Estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.13, n.3, Aug, 1998.
- [6] CLEMENTS, K. A. and COSTA, A. J. A. S. Topology Error Identification Using Normalized Lagrange Multipliers. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 13, n. 2, 1998.
- [7] LOURENÇO, E. M., COSTA, A. S. and CLEMENTS, K. A. Bayesian-based hypothesis testing for topology error identification in generalized state estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 19, n. 2, May, 2004.
- [8] LOURENÇO, E. M., COSTA, A. S., CLEMENTS, K. A. and CERNEV, R. A. A topology error identification method directly based on collinearity tests. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 21, n. 4, Nov, 2006.
- [9] EXPOSITO, A. G. e JÁEN, A. V. Implicitly constrained substation model for state estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.17, n.3, Aug, 2002.
- [10] ABUR, A., KIM, H. and CELIK, M. K. Identifying the unknown circuit breaker statuses in power networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, n. 4, Nov, 1995.
- [11] KORRES, G. N. e KATSIKAS, P. J. Identification of circuit breaker statuses in WLS state estimator. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 17, n. 3, Aug, 2002.
- [12] IRVING, M. R. Robust algorithm for generalized state estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 24, n. 4, 2009.

- [13] LOURENÇO, E. M., COELHO, E. P. R, PAL, B. C.. Topology Error and Bad Data Processing in Generalized State Estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 30, n. 6, 2015.
- [14] COELHO, T. C., LOURENÇO, E. M. and COSTA, A. J. A. S. Anomaly zone determination for topology error processing in power system state estimation. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, v. 24, n. 3, 2013.
- [15] COSTA, A. J. A. S., LOURENÇO, E. M. and COLZANI, L. Reduced Anomaly Zone Determination for Topology Error Processing in Generalized State Estimation, **IEEE Power Tech**, Lausanne, 2007.
- [16] EXPOSITO, A. G. and JÁEN, A. V. Reduced substation models for generalized state estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 16, n. 4, 2001.
- [17] JÁEN, A. V., ROMERO, P. C. and EXPOSITO, A. G. Substation data validation by a local three-phase generalized state estimator. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 20, n. 1, 2005.
- [18] GARCIA, A. V, MONTICELLI, A. and ABREU, P. Fast Decoupled State Estimator and Bad Data Processing. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v.98, n.5, Oct, 1979.
- [19] MONTICELLI, A. and GARCIA, A. V. Fast decoupled state estimators. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 5, n. 2, 1990.
- [20] ABUR, A. and EXPOSITO, A. G. **Power System State Estimation - Theory and Implementation**. CRC Press, 2004.
- [21] MONTICELLI, A. **State Estimation in Electric Power Systems - A Generalized Approach**. Springer Science, 1999.
- [22] HORISBERGER, H. P. RICHARD, J. C. and ROSSIER, C. A Fast Decoupled Static State-Estimator for Electric Power Systems. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v.95, n. 1, 1976.