

ESTIMAÇÃO DE ESTADOS GENERALIZADA DESACOPLADA RÁPIDA PARA SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO

ELLEN M. M. NOGUEIRA, ELIZETE M. LOURENÇO, MONICA A. B. C. DA SILVA, ODILON L. TORTELLI

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA, UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - UFPR
CAIXA POSTAL 19001, CENTRO POLITÉCNICO, 81531-970, CURITIBA, PR, BRASIL.

E-MAILS: ELLEN.NOGUEIRA@UFPR.BR, ELIZETE@ELETRICA.UFPR.BR, MONICA.ABIDO@COPEL.COM, ODILON@ELETRICA.UFPR.BR

Abstract— This article proposes the application of decoupling techniques to the Generalized State Estimation (EEG). The representation of switches and circuit breakers and also the handiness of internal information of the substation devices, made possible by the EEG, allow a better understanding of the system operational conditions. However, this representation causes a significant increase in the size of the problem. So, the use of decoupling techniques as proposed in this work, become a perfect ally for EEG. Moreover, the increased complexity of distribution system operation, also impacted by smart grid technologies, has driven the use of state estimation. The complex normalization technique, recently proposed in literature, is properly applied, thereby allowing the effective use of the proposed decoupled state estimation for distribution systems. The resulting tool is able to process transmission and distribution networks, providing effective system estimation.

Keywords— Decoupled State Estimation, Fast Decoupled Method, Bus Section Level Network Modelling, Complex *Per Unit* Normalization (*cpu*), Transmission Systems, Distribution Systems.

Resumo— Este artigo propõe a aplicação de técnicas de desacoplamento à formulação da Estimação de Estados Generalizada (EEG). A representação de chaves e disjuntores e a disponibilidade de informações internas das subestações, viabilizadas pela EEG, permitem um melhor conhecimento do ponto de operação do sistema. Entretanto, esta representação provoca um aumento significativo da dimensão do problema e, dessa forma, as técnicas de desacoplamento propostas nesse trabalho se tomam um perfeito aliado para EEG. Além disso, o aumento da complexidade de operação dos sistemas de distribuição, observada através da inserção das tecnologias Smart Grid, tem estimulado o emprego da estimação de estados nesses sistemas. A técnica de normalização complexa, recentemente proposta na literatura, é adequadamente explorada nesta proposta, permitindo assim o uso efetivo da estimação de estados desacoplada em sistemas de distribuição. Como resultado tem-se uma ferramenta de estimação de estados capaz de processar redes de transmissão e distribuição, apresentando resultados eficazes quanto a determinação do ponto de operação de tais sistemas.

Palavras-chave— Estimação de Estados Desacoplada, Método Desacoplado Rápido, Modelagem da Rede no Nível de Seção de Barras, Normalização Complexa por Unidade (*cpu*), Sistemas de Transmissão, Sistemas de Distribuição.

1 Introdução

Desde que foi proposta (Schweppe, Wildes e Rom, 1970), a Estimação de Estados (EE) tem evoluído e desempenhado um papel fundamental para a segurança, monitoração e modelagem do sistema elétrico. O problema básico da EE consiste na determinação da melhor estimativa para geração, carregamentos, fluxos de potência e tensões em um dado ponto de operação, através de um conjunto de medidas disponíveis. Assim, através do processamento desse conjunto e da relação matemática entre os estados do sistema (tensão complexa em todas as barras) e as medidas disponíveis, gera-se um fluxo de carga em tempo real.

A modelagem tradicional da análise em regime permanente em sistemas de potência é a *barra-ramo*, onde os arranjos de subestações representados por chaves e disjuntores fechados são agrupados, formando um único barramento. A não representação de chaves e disjuntores evita a utilização de valores atípicos de impedância para representar a posição fechada/aberta desses dispositivos e, por consequência, os problemas numéricos relacionados à sua utilização.

Visando o aproveitamento de medidas no interior das subestações, bem como a obtenção de informações acerca dos status de dispositivos de manobras e, assim, melhorar a capacidade de processamento de erros inerentes à topologia da rede, Monticelli e Garcia (1991) e Monticelli (1993) desenvolveram uma modelagem de ramos com impedância nula, culminando, no

final da década de 90, na Estimação de Estados Generalizada (EEG) (Alsac *et al.*, 1998). Para a operação em tempo real, a principal dificuldade relacionada a essa modelagem é o aumento da dimensão do problema, já que os fluxos de potência ativa e reativa nos ramos chaveáveis modelados e as tensões complexas nas seções de barra são incluídos como novas variáveis de estado. Adicionalmente, as informações relacionadas aos status desses dispositivos são incluídas como novas equações do problema de EE. Uma consequência direta desse aumento na dimensão do problema é o aumento expressivo do custo computacional quando da adoção da modelagem detalhada realizada pela EEG.

Assim, torna-se imperativo o desenvolvimento de alternativas que permitam um algoritmo eficiente, com alta capacidade de processamento, para estimação do ponto de operação do sistema elétrico. Nesse sentido, o presente artigo propõe uma abordagem desacoplada para a EEG. Essa abordagem busca aliar o alto desempenho computacional de métodos desacoplados à modelagem da rede no nível de seção de barras, resultando na Estimação de Estados Generalizada Desacoplada Rápida (EEG-DR). A adequação do método desacoplado à formulação da EEG, descrita em detalhes nesse artigo, reduz de forma significativa o custo computacional associado a modelagem detalhada da rede, tornando-a compatível com a operação em tempo real.

Além disso, este artigo propõe a utilização da normalização complexa por unidade (Durge *et al.* (2012),

Tortelli *et al.* (2015)), permitindo a aplicação da EEG-DR proposta tanto para sistemas de transmissão como para sistemas de distribuição emergentes. Manobras de abertura e fechamento para operações em anel, cada vez mais comuns nesses sistemas, podem ser facilmente modeladas a partir da representação explícita de chaves e disjuntores presente na EEG-DR.

2 Técnicas de Desacoplamento na Estimação de Estados Convencional

Esta seção descreve os fundamentos básicos do estimador de estados considerando a abordagem desacoplada que compõe a metodologia proposta neste trabalho.

2.1 Estimação de Estados Desacoplada Convencional

A EE busca obter as tensões complexas em todas as barras do sistema. Na formulação clássica, realiza-se a minimização da soma ponderada dos quadrados dos resíduos visando encontrar as estimativas para o vetor de estados que melhor se ajustam ao modelo de medição. Sendo assim, a função objetivo a ser minimizada é dada por:

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

onde:

z^m : vetor de quantidades medidas; $h^m(\cdot)$: vetor de funções não lineares que relaciona as quantidades medidas às variáveis de estado; $\hat{x}$: vetor de estados estimados, i. e., módulo e ângulo das tensões nodais; R^m : matriz de covariância dos erros de medição.

A solução do problema representado pela Eq. (1) pode ser obtida resolvendo-se iterativamente o sistema linear da Eq. (2) (Abur; Gomez-Expósito, 2004):

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

onde:

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

A abordagem desacoplada se baseia no acoplamento P- θ , Q-V para dividir o problema em duas partes: ativa (denotada pelo subscrito P) e reativa (denotada pelo subscrito Q), a exemplo do que é feito na formulação do fluxo de potência desacoplado.

Nesse sentido, o vetor de quantidades medidas é particionado, de forma que:

$$z^m = \begin{bmatrix} z_p^m \\ z_q^m \end{bmatrix}, \text{ sendo: } z_p^m = \begin{bmatrix} t \\ p \end{bmatrix} \text{ e } z_q^m = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde:

t e u são os vetores de medidas de fluxo de potência ativa e reativa, respectivamente, p e q são os vetores de medidas de injeção de potência ativa e reativa, respectivamente e V é o vetor de magnitude de tensão nas barras.

A versão desacoplada rápida segue a formulação do estimador de estados desacoplado no modelo, onde

as aproximações são realizadas na matriz Jacobiana, que passa a ser representada por:

$$H(V, \theta) = \begin{bmatrix} H_{p\theta} & 0 \\ 0 & H_{qv} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Consequentemente, a matriz de ganho fica:

$$G = \begin{bmatrix} G_{p\theta} & 0 \\ 0 & G_{qv} \end{bmatrix} \quad (5)$$

onde:

$$G_{p\theta} = H_{p\theta}^T R_p^{-1} H_{p\theta} \text{ e } G_{qv} = H_{qv}^T R_Q^{-1} H_{qv}$$

Sendo que:

R_p e R_Q são as matrizes de covariância dos problemas ativo e reativo, respectivamente.

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

$$G \Delta \hat{x} = T \quad (6)$$

onde:

$$T = \begin{bmatrix} H_{p\theta}^T R_p^{-1} \Delta z_p \\ H_{qv}^T R_Q^{-1} \Delta z_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_p \\ T_q \end{bmatrix};$$

$$\Delta z_p = z_p^m - h_p(\hat{x}); \Delta z_q = z_q^m - h_q(\hat{x});$$

A formulação acima e todas as demais formulação desacopladas consideram a modelagem barra-ramo da rede. Neste trabalho propõe-se a extensão dessa formulação de forma a torná-la capaz de processar redes modeladas no nível de seção de barras, como descrito na próxima seção.

3 Estimação de Estados Generalizada Desacoplada Rápida

Nesta seção descreve-se a abordagem proposta, que combina a modelagem de redes no nível de seção de barras e as técnicas de desacoplamento, dando origem à Estimação de Estados Generalizada Desacoplada Rápida (EEG-DR). Conforme mencionado anteriormente, a aplicação de técnicas de desacoplamento tem como principal objetivo a redução do esforço computacional adicional, inerente a EEG devido ao aumento no número de variáveis de estado e a inclusão das equações que modelam os status dos ramos chaveáveis, conforme descrito na sequência.

3.1 Extensão dos vetores de estado e vetores de medida

Seguindo a representação de chaves e disjuntores (*ramos chaveáveis*), proposta em Monticelli e Garcia (1991) e Monticelli (1993), este artigo propõe igualmente a inclusão dos fluxos de potência nas chaves e disjuntores como novas variáveis de estado do problema, juntando-se aos módulos e ângulos das tensões nodais.

Considerando a abordagem desacoplada proposta neste trabalho, o vetor de estados no nível de seção de barras, ou nível de subestação, x^{ns} , é particionado segundo a natureza ativa e reativa das variáveis de estado, ou seja:

$$\mathbf{x}^{ns} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_p^{ns} \\ \mathbf{x}_q^{ns} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{sendo: } \mathbf{x}_p^{ns} = \begin{bmatrix} \theta \\ \mathbf{t}_d \end{bmatrix} \text{ e } \mathbf{x}_q^{ns} = \begin{bmatrix} \mathbf{V} \\ \mathbf{u}_d \end{bmatrix}$$

onde:

$\mathbf{V}$ e θ são os vetores de magnitude e fase das tensões nas barras, respectivamente, e $\mathbf{t}_d$ e $\mathbf{u}_d$ são os vetores de fluxo de potência ativa e reativa através dos ramos chaveáveis, respectivamente.

As informações a respeito dos status dos ramos chaveáveis são incluídas na formulação do problema como pseudomedidas. Portanto, se um ramo chaveável conectado entre os nós i e j está fechado, tanto a diferença de potencial quanto a diferença 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 é que são nulos, ou seja, $t_{ij} = 0$ e $u_{ij} = 0$.

Enquanto a modelagem no nível de seção de barras estende o vetor de medidas $\mathbf{z}$ de forma a contemplar medidas convencionais e as pseudomedidas operacionais de disjuntores fechados e abertos, descritas acima, a abordagem desacoplada agrupa essas informações de acordo com sua natureza ativa ou reativa, de forma que o vetor de medidas na modelagem no nível de seção de barras, $\mathbf{z}^{ns}$, é dado por:

$$\mathbf{z}^{ns} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}^m \\ \mathbf{z}^o \end{bmatrix} \text{ com } \mathbf{z}^o = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_p^o \\ \mathbf{z}_q^o \end{bmatrix} \quad (8)$$

onde:

$\mathbf{z}^m$ é o vetor de medidas, $\mathbf{z}_p^o$ é o vetor contendo as pseudomedidas ativas relacionadas ao status dos disjuntores, ou seja, diferença angular nula ou fluxo de potência ativa nula para disjuntor fechado ou aberto, respectivamente, e $\mathbf{z}_q^o$ é o vetor correspondente às pseudomedidas reativas relacionadas ao status dos disjuntores.

Assim, os vetores de medidas correspondentes às Eqs. (3) e (8), que levam em conta as informações operacionais e o particionamento, são definidos por:

$$\mathbf{z}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_p^m \\ \mathbf{z}_p^o \end{bmatrix} \text{ e } \mathbf{z}_q = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_q^m \\ \mathbf{z}_q^o \end{bmatrix} \quad (9)$$

A EEG para a modelagem no nível de seção de barras requer ainda a revisão das funções que relacionam as medidas de injeções de potência e os estados, de forma a 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, para os ramos chaveáveis, os fluxos de potência devem ser expressos diretamente em função das novas variáveis de estado.

Assim, as funções não lineares que relacionam as medidas de injeção de potência ativa e reativa com os estados são definidas por:

$$\begin{aligned} P_k &= \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) + \sum_{l \in \Gamma_k} t_{kl} \\ Q_k &= -Q_k^{sh}(V_k) + \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) + \sum_{l \in \Gamma_k} u_{kl} \end{aligned} \quad (10)$$

onde:

Ω_k : conjunto de barras conectadas à barra k através de ramos convencionais;

Γ_k : conjunto de barras conectadas à barra k através de ramos chaveáveis.

Lembrando que medidas de injeção de potência ativa estarão contidas no conjunto de medidas ativas

$\mathbf{z}_p^m$ e medidas de injeção de potência reativa estarão contidas no conjunto de medidas reativas $\mathbf{z}_q^m$.

3.2 Solução pelo Método Desacoplado Rápido

A partir do desacoplamento apresentado na Subseção 3.1, o vetor de medidas estendido pode ser representado por:

$$\mathbf{z}_p^m = \begin{bmatrix} \mathbf{t} \\ \mathbf{p} \end{bmatrix} \text{ e } \mathbf{z}_q^m = \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{q} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{z}_p^o = \begin{bmatrix} \theta_f^o \\ \mathbf{t}_a^o \end{bmatrix} \text{ e } \mathbf{z}_q^o = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_f^o \\ \mathbf{u}_a^o \end{bmatrix} \quad (12)$$

onde:

θ_f^o : vetor de diferença angular nula para disjuntores fechados; $\mathbf{V}_f^o$: vetor de diferença de potencial nulo

para disjuntores fechados; $\mathbf{t}_a^o$: vetor de fluxo de potência ativa nula para disjuntores abertos; $\mathbf{u}_a^o$: vetor de fluxo de potência reativa nula para disjuntor aberto.

A matriz Jacobiana (completa) do problema estendido, considerando as informações operacionais do problema de EEG e o particionamento P- θ e Q-V correspondente, pode ser expressa por:

$$\mathbf{H}^{ns} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{p\theta} & \mathbf{H}_{pV} \\ \mathbf{H}_{q\theta} & \mathbf{H}_{qV} \end{bmatrix} \quad (13)$$

onde:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{p\theta}^{ns} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial t}{\partial \theta} & \frac{\partial t}{\partial \mathbf{t}_d} \\ \frac{\partial \mathbf{p}_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial \mathbf{p}_{inj}}{\partial \mathbf{t}_d} \\ \frac{\partial \theta_f^o}{\partial \theta} & \frac{\partial \theta_f^o}{\partial \mathbf{t}_d} \\ \frac{\partial \mathbf{t}_a^o}{\partial \theta} & \frac{\partial \mathbf{t}_a^o}{\partial \mathbf{t}_d} \end{bmatrix}; \mathbf{H}_{pV}^{ns} = \begin{bmatrix} \frac{\partial t}{\partial V} & \frac{\partial t}{\partial \mathbf{u}_d} \\ \frac{\partial \mathbf{p}_{inj}}{\partial V} & \frac{\partial \mathbf{p}_{inj}}{\partial \mathbf{u}_d} \\ \frac{\partial \theta_f^o}{\partial V} & \frac{\partial \theta_f^o}{\partial \mathbf{u}_d} \\ \frac{\partial \mathbf{t}_a^o}{\partial V} & \frac{\partial \mathbf{t}_a^o}{\partial \mathbf{u}_d} \end{bmatrix} \\ \mathbf{H}_{q\theta}^{ns} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \theta} & \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{t}_d} \\ \frac{\partial \mathbf{q}_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial \mathbf{q}_{inj}}{\partial \mathbf{t}_d} \\ \frac{\partial \mathbf{V}_f^o}{\partial \theta} & \frac{\partial \mathbf{V}_f^o}{\partial \mathbf{t}_d} \\ \frac{\partial \mathbf{u}_a^o}{\partial \theta} & \frac{\partial \mathbf{u}_a^o}{\partial \mathbf{t}_d} \end{bmatrix}; \mathbf{H}_{qV}^{ns} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial V} & \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{u}_d} \\ \frac{\partial \mathbf{q}_{inj}}{\partial V} & \frac{\partial \mathbf{q}_{inj}}{\partial \mathbf{u}_d} \\ \frac{\partial \mathbf{V}_f^o}{\partial V} & \frac{\partial \mathbf{V}_f^o}{\partial \mathbf{u}_d} \\ \frac{\partial \mathbf{u}_a^o}{\partial V} & \frac{\partial \mathbf{u}_a^o}{\partial \mathbf{u}_d} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

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

$$H_{P\theta}^{ns} = \begin{bmatrix} \frac{\partial t}{\partial \theta} & 0 \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial \theta} & \begin{Bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{Bmatrix} \\ \begin{Bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{Bmatrix} & 0 \\ 0 & \begin{Bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{Bmatrix} \end{bmatrix} \text{ e } H_{PV}^{ns} = \begin{bmatrix} \frac{\partial t}{\partial V} & 0 \\ \frac{\partial V}{\partial P_{inj}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$H_{Q\theta}^{ns} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \theta} & 0 \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial \theta} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ e } H_{QV}^{ns} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial V} & 0 \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial V} & \begin{Bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{Bmatrix} \\ \begin{Bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{Bmatrix} & 0 \\ 0 & \begin{Bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{Bmatrix} \end{bmatrix}$$

Analisando a Eq. (15), observa-se que os blocos H_{PV} e $H_{Q\theta}$ são compostos por uma grande quantidade de valores nulos, em especial no que se refere às novas informações oriundas do status de chaves e disjuntores. Somados ao desacoplamento natural observado em sistemas de transmissão, as submatrizes da matriz ganho, que relacionam medidas ativas e magnitudes de tensão, e medidas reativas e ângulos de tensão são bem menos significativas que as matrizes diagonais. 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. Dessa forma, a matriz de ganho desacoplada pode ser igualmente representada por:

$$G_{P\theta}^{ns} = H_{P\theta}^{nsT} R_P^{-1} H_{P\theta}^{ns} \quad (16)$$

$$G_{QV}^{ns} = H_{QV}^{nsT} R_Q^{-1} H_{QV}^{ns}$$

Sendo que as submatrizes de covariância para o problema ativo e reativo são dadas por:

$$R_P = \begin{bmatrix} R_P^m & 0 \\ 0 & R_P^o \end{bmatrix}; \quad R_Q = \begin{bmatrix} R_Q^m & 0 \\ 0 & R_Q^o \end{bmatrix} \quad (17)$$

Na formulação desacoplada rápida o vetor do lado direito da equação normal sofre igualmente as partições e aproximações realizadas na matriz Jacobiana, de forma que estes passam a ser calculados por:

$$T^{ns} = \begin{bmatrix} H_{P\theta}^{nsT} R_P^{-1} \Delta z_P^{ns} \\ H_{QV}^{nsT} R_Q^{-1} \Delta z_Q^{ns} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_P^{ns} \\ T_Q^{ns} \end{bmatrix}; \quad (18)$$

Dadas as submatrizes utilizadas no processo de EE, resolve-se a cada iteração a parte ativa e reativa do problema, buscando encontrar o ponto de operação do sistema. Dessa forma, observam-se as Eqs. (19) e (20), correspondentes ao problema ativo e reativo, respectivamente:

$$G_{P\theta}^{ns} \Delta \hat{x}_P^{ns} = T_P^{ns} \quad (19)$$

$$G_{QV}^{ns} \Delta \hat{x}_Q^{ns} = T_Q^{ns} \quad (20)$$

onde: $\Delta \hat{x}_P^{ns} = \begin{bmatrix} \Delta \hat{\theta} \\ \Delta \hat{t}_d \end{bmatrix}; \Delta \hat{x}_Q^{ns} = \begin{bmatrix} \Delta \hat{V} \\ \Delta \hat{u}_d \end{bmatrix}$

Assim, são atualizados os vetores de estados:

$$\hat{x}_P^{ns,k+1} = \hat{x}_P^{ns,k} + \Delta \hat{x}_P^{ns,k} \quad (21)$$

$$\hat{x}_Q^{ns,k+1} = \hat{x}_Q^{ns,k} + \Delta \hat{x}_Q^{ns,k} \quad (22)$$

onde o índice k corresponde ao número da iteração.

3.3 Aplicação a Sistemas de Distribuição

A evolução dos sistemas de distribuição ditada pelos avanços das tecnologias *Smart Grid* e, por consequência, o aumento da monitoração e mudanças na topologia dessas redes (com frequentes operações em anel), tem tornado a EE uma ferramenta atrativa e necessária para operação e controle neste segmento do sistema elétrico.

A eficácia dos métodos desacoplados para EE está associada à baixa sensibilidade P-V e Q- θ observada em sistema de transmissão. Isso se deve aos altos níveis da relação X/R característicos das linhas de transmissão. Já as linhas de distribuição apresentam, tipicamente, baixas relações X/R, dificultando o uso de métodos desacoplados.

A Normalização Complexa por Unidade (*cpu*), proposta em Durce *et al.* (2012) e Tortelli *et al.* (2015), permite elevar artificialmente a relação X/R de sistemas de distribuição, possibilitando o uso da estimação de estados desacoplada como apresentado em Nogueira; Lourenço e Tortelli (2014).

A abordagem apresentada em Nogueira, Lourenço e Tortelli (2014) considera a modelagem barra-ramo da rede. Neste trabalho propõe-se a aplicação da *cpu* na EEG-DR, permitindo assim a modelagem explícita de chaves e disjuntores em redes de distribuição. Essa nova abordagem automatiza a modelagem de manobras envolvendo a operação em anel, cada vez mais frequentes nos sistemas de distribuição emergentes.

3.4 Algoritmo Proposto

O algoritmo apresentado na Fig. 1 ilustra a metodologia proposta, que possibilita o uso da normalização convencional (*pu*) para Sistemas de Transmissão (ST), onde as técnicas de desacoplamento são naturalmente apropriadas, ou da normalização complexa (*cpu*), acionada para Sistemas de Distribuição (SD) com baixa relação X/R. O algoritmo possibilita ainda a escolha da representação da rede em estudo: modelagem barra-ramo convencional ou modelagem no nível de seção de barras, para representação detalhada de determinadas subestações ou de chaves de manobra em operações em anel.

No caso da modelagem barra-ramo, utiliza-se o EE Desacoplado Convencional e a tensão complexa estimada será a mesma, independente de qual normalização (*pu* ou *cpu*) tenha sido aplicada. Já no caso da modelagem no nível de seção de barra, utiliza-se o EEG-DR. Nesta situação, é necessário identificar o tipo de normalização aplicada, já que, variáveis como fluxo de potência através dos disjuntores precisam ser

submetidas à normalização inversa, de tal forma a fornecer os resultados em *pu*, conforme adotado nos centros de operação.

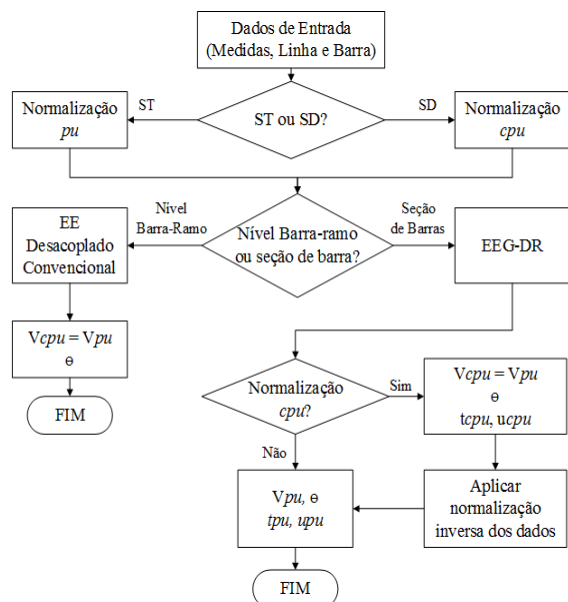


Figura 1. Fluxograma da formulação proposta

4 Simulações e Resultados

O algoritmo apresentado na Seção 3.4 foi implementado em Matlab. Nessa seção são apresentados os resultados obtidos a partir de simulações com o sistema de 24 barras do IEEE (sistema de transmissão), cujos dados e diagrama unifilar podem ser encontrados em Billinton, Vohra e Kumar (1985), e com um sistema de distribuição contendo 12 barras, cujos dados originais podem ser obtidos em Eminoglu, Gözel e Hocaoglu (2010).

4.2 Sistema de Transmissão: IEEE 24 barras

O sistema de 24 barras do IEEE foi usado para avaliar a aplicação do EEG-DR a sistemas de transmissão. O plano de medição é composto por medidas de fluxo ativo e reativo nos ramos e medidas de injeção ativa e reativa em todas as barras, além de medidas de magnitude da tensão em todas as barras.

A relação X/R desse sistema é alta (média de 12,75), o que permite a escolha da normalização *p.u.* convencional no algoritmo proposto. Com relação à modelagem adotada, optou-se pela representação no nível de seção de barras, sendo que as subestações 14 e 16 do sistema original foram selecionadas para representação nesse nível de detalhe (as demais barras foram mantidas na representação barra-ramo). A Fig. 2 mostra a configuração e condição de operação adotadas para as subestações 14 e 16, que elevam o número total de barras/nós do sistema de 24 para 34 barras, como ilustrado na figura.

Seguindo o algoritmo da Fig. 1, aplica-se a EEG-DR que fornece as estimativas para as tensões complexas em todas as barras e seções de barras, bem como os fluxos de potência ativa e reativa através de

todos os disjuntores modelados. Por restrições de espaço, os resultados são parcialmente apresentados na Tabela 1.

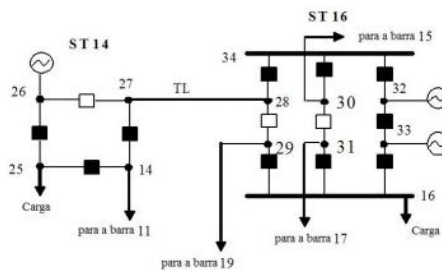


Figura 2. Modelagem das Subestações 14 e 16

Tabela 1. Estimativa de Estados para o Sistema IEEE 24 barras

Sistema IEEE 24 barras					
Barra	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	Barra	Tensão (pu)	Ângulo (graus)
1	1,0350	0,0000	11	0,9963	8,3441
2	1,0350	0,1858	15	1,0140	24,7729
14	0,9800	14,2790	17	1,0386	28,2920
16	1,0170	23,8955	19	1,0221	23,5805

Na Tabela 2 são apresentadas algumas das estimativas obtidas para os fluxos de potência através dos disjuntores fechados modelados nas SEs 14 e 16. 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 2. Fluxo de Potência nos Ramos Chaveáveis

Ramo	Fluxo de Potência (pu)
Subestação 14	
14-25	-1,9400 - j 0,6642
Subestação 16	
16-33	1,9529 + j 0,4307
32-33	-2,7279 - j 0,7144
32-34	3,5029 + j 0,9981

No caso do sistema IEEE 24 barras foi adotada uma tolerância de 10^{-3} para o critério de parada e o sistema convergiu em 6 iterações ativas e 6 iterações relativas. O maior erro verificado entre os valores das grandezas estimadas e os valores verdadeiros dessas grandezas foi de 0,013%, comprovando claramente que o método desacoplado rápido apresenta excelente desempenho também na abordagem generalizada, onde subestações previamente selecionadas podem ser facilmente representadas no nível de seção de barras.

4.3 Sistema de Distribuição: 13 barras

Para avaliar o desempenho do algoritmo proposto no processamento de redes de distribuição foi utilizado o sistema de 12 barras, incluindo as seguintes modificações: adição de uma barra (barra 13), uma linha (10-13) com impedância de $4,4044 + j 1,2100 \Omega$, e duas unidades de geração distribuída de 43,5 kW e 28,35kVar, além de um disjuntor entre as barras 12-13, conforme ilustrado na Fig. 3. A modelagem desse disjuntor permite a análise da operação em anel simplesmente considerando a posição fechada desse dispositivo, o que é facilmente modelado na representação generalizada do estimador desacoplado proposto.

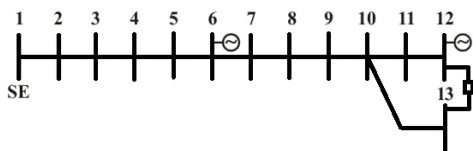


Figura 3. Sistema 13 barras

A relação X/R média desse sistema é de 0,3527, muito baixa para as aproximações adotadas na formulação desacoplada, indicando a necessidade da aplicação da normalização complexa. Uma simulação utilizando a normalização *p.u.* convencional indica que o EEG-DR não converge nesse caso, corroborando com a expectativa de necessidade do uso da *cpu*. Considerando as características do sistema e as formulações apresentadas em Nogueira; Lourenço e Tortelli (2014) e Tortelli *et al.* (2015), a normalização *cpu* no algoritmo proposto foi acionada, resultando em um ângulo de base, Φ_{base} , de 70° .

A Tabela 3 apresenta alguns dos estados estimados para o sistema da Figura 3, considerando dois casos. No Caso A, considerou-se o disjuntor 12-13 fechado e no Caso B, aberto. Em ambos os casos o EEG-DR convergiu em 3 iterações ativas e 2 iterações reativas, com uma tolerância de 10^{-3} .

Tabela 3. Estimação de Estados para o Sistema 13 barras

Sistema 13 barras				
Φ_{base}	70°			
Caso	A		B	
Barra	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	Tensão (pu)	Ângulo (graus)
10	0,9571	1,2171	0,9571	1,2171
11	0,9567	1,2313	0,9569	1,2276
12	0,9569	1,2310	0,9572	1,2243
13	0,9569	1,2310	0,9564	1,2418

No Caso A, as tensões complexas estimadas nas barras 12 e 13 foram as mesmas, já que estas correspondem às barras terminais do disjuntor fechado. O maior erro encontrado entre os valores verdadeiros e os estimados nesse caso foi de 0,01%. No Caso B, onde o disjuntor está aberto, as tensões entre as barras 12 e 13 são diferentes, como esperado. O maior erro encontrado nesse caso foi de 0,03%.

A obtenção dos pontos de operação nos dois casos mostra a efetividade da ferramenta na utilização da *cpu*, que viabiliza o uso do EEG-DR para sistemas de distribuição emergentes.

5 Conclusão

A EEG permite a representação de regiões de interesse da rede no nível de seção de barras e tem sido explorada em diversas pesquisas apresentadas na literatura, com especial ênfase no processamento de erros de topologia. No entanto, o aumento da dimensão do problema impacta diretamente no tempo de processamento, o que dificulta sua aplicação em tempo real.

A EEG-DR proposta nesse trabalho contorna essa dificuldade, aliando as técnicas de desacoplamento à modelagem no nível de seção de barras. Além disso,

demonstra-se que as técnicas de normalização complexa viabilizam a aplicação da EEG-DR para sistemas de distribuição.

Os resultados obtidos a partir da aplicação do algoritmo proposto demonstram que a modelagem no nível de seção de barras não deteriora o eficiente desempenho do estimador desacoplado rápido, comprovando seu potencial para aplicações em tempo real.

Referências Bibliográficas

- Abur, A. e Gómez Expósito, A. (2004). Power System State Estimation: Theory and Implementation. New York, NY: CRC Press, Taylor & Francis, 327 p.
- Alsaç, O.; Vempati, N.; Stott, B. e Monticelli, A. (1998). Generalized state estimation. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 13, no. 3, pp. 1069-1075.
- Billinton, R., Vohra, P. K. e Kumar, S. (1985). Effect of station originated outages in a composite system adequacy evaluation of the IEEE reliability test system. IEEE Transactions Power Apparatus System, vol. PAS-104, pp. 2249-2656.
- Durce, C. C.; Lourenço, E. M.; Tortelli, O. L. e Loddi, T. (2012). Complex Normalization to Perform Power Flow Analysis In Emerging Distribution Systems. In: IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Berlin. pp. 1-6.
- Eminoglu, U.; Gözel, T.; Hocaoglu, M. H. (2010). DSPFAP: Distribution systems power flow analysis package using Matlab graphical user interface (GUI). Computer Applications in Engineering Education, v. 18, no. 1, pp. 1-13.
- Monticelli, A. e Garcia, A. (1991). Modeling Zero Impedance Branches in Power Systems State Estimation. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 6, no. 4, pp. 364-370.
- Monticelli, A. (1993). The Impact of Modeling Short Circuits Branches in State Estimation. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, no. 1, pp. 1561-1566.
- Nogueira, E. M. M.; Lourenço, E. M.; Tortelli, O. L. (2014). Estimação de Estados para Sistemas de Distribuição via Normalização Complexa. In: XIII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica - SEPOPE, Foz do Iguaçu. pp. 1-7.
- Schweppe, F. C.; Wildes, J. e Rom, D. B. (1970). Power System Static-State Estimation. IEEE Transactions Power Apparatus System, vol. PAS-89, no. 1, pp. 120-125.
- Tortelli, O. L.; Lourenço, E. M.; Garcia, A. V. e Pal, B. C. (2015). Fast Decoupled Power Flow to Emerging Distribution Systems via Complex pu Normalization. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 30, no. 3, pp. 1351-1358.